

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos
Informe final de proyectos de investigación y extensión

Título

“Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica”

Investigadores

Dagoberto Arias Aguilar (Coordinador)

Juan Carlos Valverde Otárola

Freddy Muñoz Acosta

Giovanni Garro Monge

Katherine Sánchez Zuñiga

Karol Jiménez Quesada

Jesús Mora Molina

Marlen Camacho

Luis Barboza Fallas

Indice

Indice	2
1 Código y Título del proyecto	5
2 Autores y direcciones	5
3 Resumen	6
3.1 <i>Resumen en español</i>	6
3.2 <i>Abstract</i>	6
3.3 <i>Palabras clave</i>	7
3.4 <i>Keywords</i>	7
4 Introducción	7
5 Objetivos	8
5.1 <i>Objetivo general</i>	9
5.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
6 Métodos de investigación utilizados	9
7 Marco Teórico	9
8 Metodología	12
8.1.1 Descripción del sitio y especies	12
8.1.2 Diseño experimental	12
8.1.3 Tiempo de estudio y condiciones experimentales	13
8.1.4 Parámetros dasométricos	13
8.1.5 Parámetros fisiológicos	13
8.1.6 Análisis estadístico	13
8.2 <i>Metodología para actividades del OE2. Extracción de ADN para caracterización molecular de variedades de abacá</i>	14
8.2.1 Sitios de muestreo	14
8.2.2 Extracción de ADN	14
8.2.3 Protocolo de PCR	15
8.2.4 Optimización de la temperatura de anillamiento (T _m) de cada marcador	17
8.2.5 Electroforesis	17
8.2.6 Electroforesis capilar acoplada a fluorescencia	17
8.3 <i>Metodología para actividades del OE2. Obtener el protocolo óptimo para la propagación asexual in vitro del abacá para el suministro de semilla de calidad para los productores</i>	18
8.4 <i>Metodología para actividades del OE3. Caracterizar física y químicamente la fibra en función de sitio, cultivares y el estado de madurez</i>	18

8.4.1	Genotipos evaluados y procedencia del material	18
8.4.2	Obtención de las fibras	19
8.4.3	Caracterización de la fibra	19
8.4.4	Diferenciación entre genotipos y recomendaciones de uso	20
8.4.5	Análisis estadístico	20
8.5	<i>Metodología para actividad del OE3. Caracterización de tableros de partículas de Gmelina arborea roxb. reforzados con fibra de Musa textilis née</i>	21
8.5.1	Procedencia del material	21
8.5.2	Proceso de fabricación de los tableros prensado	21
8.5.3	Caracterización de los tableros	22
8.6	<i>Metodología para actividad adicional dentro del OE3. Evaluación de prototipos de papel elaborados a partir de cinco genotipos comerciales de Musa textilis née cultivados en la región tropical</i>	23
8.6.1	Procedencia y selección de materia prima	23
8.6.2	Proceso de deslignificación	24
8.6.3	Caracterización química de la pulpa	24
8.6.4	Formación de las láminas de papel	24
8.6.5	Caracterización de las láminas de papel	24
8.6.6	Análisis estadístico	25
8.7	<i>Metodología para actividades del OE4. Transferir los conocimientos generados a productores y extensionistas de abacá a nivel nacional</i>	26
9	Resultados	27
9.1	<i>Resultados del OE1. Evaluar el comportamiento fisiológico y el rendimiento del componente arbóreo en asocio con el cultivo de abacá bajo diferentes condiciones de sombra y régimen de manejo.</i>	27
9.1.1	Plantaciones establecidas por el proyecto y sitios de ensayos	27
9.1.2	Fichas técnicas de 5 especies forestales para sistemas agroforestales con abacá	41
9.2	<i>Resultados del OE2. Obtener el protocolo óptimo para la propagación sexual y asexual del abacá para el suministro de semilla de calidad para los productores.</i>	43
9.2.1	Caracterización molecular de cultivares de abacá disponibles en el país	43
9.2.2	Protocolo de introducción <i>in vitro</i> de explantes de cormos de abacá provenientes de los cultivares en el campo	51
9.2.3	Capacitación a personas productoras para atender la resolución DSFE-004-2019 sobre prevención de la enfermedad Fusarium raza 4 tropical (Foc R4T) y obtención de permisos del SFE	55
9.3	<i>Resultados del OE3. Analizar el comportamiento de biomateriales a partir de plástico reciclado y reforzados con fibra de abacá.</i>	57
9.3.1	Caracterización de la fibra de abacá según cultivares y procedencia del material	57
9.3.2	Pruebas de extrusión de polímeros a nivel industrial para la incorporación de la fibra de abacá	58
9.3.3	Estudios de combinación de fibra con residuos de madera para elaboración de tableros de partículas de <i>Gmelina arborea roxb.</i> reforzados con fibra de <i>Musa textilis</i> Née (Entregable adicional).	80
9.4	<i>Resultados del OE4. Transferir los conocimientos generados a productores y extensionistas de abacá a nivel nacional.</i>	117
9.4.1	Elaboración y publicación de un manual del cultivo de abacá en Costa Rica	117
9.4.2	Carpeta de contenidos para capacitaciones	119
9.4.3	Publicación de 4 artículos científicos	119
9.4.4	Talleres y días de campo para productores y profesionales	121

9.4.5	Seminario Internacional de uso de fibras-----	125
9.4.6	Participación en seminario organizado por la Unidad de Vinculación Forestal. -----	129
9.4.7	Participación en congresos -----	129
9.4.8	XV Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y ambiental CONAFA 2023 y el X Congreso Nacional de Suelos	132
9.4.9	Participación en concurso Emprendedor Forestal de México-----	133
9.4.10	Participación en un curso internacional totalmente financiado por la AECID.-----	133
10	Propuestas de nuevos proyectos de investigación para dar continuidad a las investigaciones -----	134
10.1	<i>Nueva propuesta: “Cultivo comercial del árbol Hevea brasiliensis (Willd. ex A.Juss.) para la producción de caucho natural en zonas rurales de Costa Rica” -----</i>	<i>134</i>
10.2	<i>Formulación de propuesta para convocatoria MIDEPLAN/Unión Europea 2022 -----</i>	<i>134</i>
10.3	<i>Nuevo trabajo final de graduación a partir de julio del 2023 -----</i>	<i>135</i>
11	Principales conclusiones-----	136
12	Principales recomendaciones-----	137
13	Agradecimientos -----	138
14	Referencias-----	139
15	Apéndice-----	142

1 Código y Título del proyecto

El proyecto de investigación se le asignó el código CF 1401093.

El nombre del proyecto inscrito en la VIE es el siguiente “Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica”

2 Autores y direcciones

Tabla 1. Información de los participantes del proyecto de investigación

Nombre y apellidos	Escuela, Área Académica o Unidad Desconcentrada	Nombramiento (Definido o indefinido)	Condición*	Meses en el proyecto	Tipo de plaza** (VIE, REC, DOC, CONS)
PhD. Dagoberto Arias Aguilar	Forestal	Indefinido	Coordinador Investigador	36	(8) REC
Máster. Juan Carlos Valverde Otárola	Forestal	Definido	Investigador	36	(8) VIE
Dr. Freddy Muñoz Acosta	Forestal	Indefinido	Investigador	36	(4) VIE
M.Sc. Giovanni Garro Monge	Biología	Indefinido	Investigador	36	(4) VIE
Máster Katherine Sánchez Zuñiga	Biología	Definido	Investigadora	30	(4) VIE
Máster Karol Jiménez Quesada	Biología	Definido	Investigadora	36	(4) VIE
Dr. Jesús Mora Molina	Química	Indefinido	Investigador	36	(4) VIE
M. Sc. Ana Marlen Camacho Calvo	Agronomía	Indefinido	Investigadora	36	(8) VIE

Master Luis Barboza	Biología	Indefinido	Investigador	6	(4) VIE
*Máster Mónica Araya Salas	Forestal		Estudiante posgrado	24	
<p>Estudiantes participantes con actividades de investigación</p> <p>*La Master Mónica Araya Salas, realizó su tesis en la maestría de Ciencias Forestales</p> <p>** El Master Luis Barboza se incorporó al proyecto del 20 de junio al 31 de diciembre del 2022, según oficio DIP-434-2022. También coincidió con la exclusión del proyecto de la Máster Katherine Sánchez a partir del 05 de mayo del 2023.</p> <p>La estudiante Adriana Fallas Cosio realizó una investigación con beca CENAT y su trabajo final de graduación.</p> <p>La estudiante Cynthia Monge Guzmán realizó su trabajo final de graduación en el proyecto.</p>					

3 Resumen

3.1 Resumen en español

Este proyecto abordó el estudio de *Musa textilis* también conocido como abacá, que un producto no maderable proveniente del bosque, y que produce una fibra natural que se extrae delseudotallo de la planta. Es un cultivo de exportación y su producción está en manos de pequeños productores. El manejo de este cultivo a nivel de finca es compatible con las políticas y estrategias de biodiversidad, descarbonización y bioeconomía impulsadas por las autoridades de gobierno del país. Particularmente en este trabajo se presentan alternativas de diversificación del cultivo mediante sistemas agroforestales para apoyar la reducción de la deforestación, el manejo y conservación de los bosques, la reforestación y el fomento de modelos productivos diversificados. Asimismo, incide en la conservación de la biodiversidad, el agua, en los valores de belleza escénica en el paisaje rural y en la dinamización de la economía. La problemática que se atiende es la falta de conocimiento científico y tecnológico sobre los aspectos relacionados con el cultivo de abacá, que incluyen a los sistemas agroforestales con especies maderables de alto valor comercial, así como la caracterización de la fibra que permita proponer nuevos usos y darle mayor valor agregado al producto de exportación; así como abrir nuevos emprendimientos a nivel nacional con el desarrollo de materiales compuestos.

3.2 Abstract

This project addressed the study of *Musa textilis* also known as abacá, which is a non-timber product from the forest, and which produces a natural fiber that is extracted from the pseudostem of the plant. It is an export crop and its production is in the hands of small producers. The management of this crop at the farm level is compatible with the biodiversity, decarbonization and bioeconomy policies and strategies promoted by the country's government authorities. Particularly in this work, crop diversification alternatives are presented through agroforestry systems to support the reduction of deforestation, the

management and conservation of forests, reforestation and the promotion of diversified production models. Likewise, it affects the conservation of biodiversity, water, the values of scenic beauty in the rural landscape and the revitalization of the economy. The problem being addressed is the lack of scientific and technological knowledge on the aspects related to the cultivation of abaca, which include agroforestry systems with timber species of high commercial value, as well as the characterization of the fiber that allows proposing new uses and give greater added value to the export product; as well as opening new ventures nationwide with the development of composite materials.

3.3 Palabras clave

Musa textilis, abaca, agroforestería, fibras naturales, especies maderables, cultivo *in vitro*

3.4 Keywords

Musa textilis, abaca, agroforestry, natural fibers, timber species, *in vitro* cultivation.

4 Introducción

Costa Rica continúa realizando diversos esfuerzos para reducir la deforestación, manejar y conservar los bosques, reforestar y establecer sistemas agroforestales (SAF). Ello lo ha posicionado como uno de los países latinoamericanos, que ha recuperado su cobertura forestal de manera satisfactoria. Estos esfuerzos además han promovido el desarrollo sostenible y equitativo en las zonas rurales, a fin de contribuir con la política de Cambio Climático y Descarbonización de la mano del cumplimiento de los ODS dentro de la agenda de Gobierno de nuestro país. De esta manera, pequeños y medianos productores han jugado un papel importante en este logro nacional, pues las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales son actividades que producen madera, son rentables, diversifican la producción en las fincas y prestan servicios ambientales que colaboran en la reducción del cambio climático. Asimismo, protegen la biodiversidad, el agua y generan belleza escénica (ONF, 2013). El abacá también conocido como cáñamo de Manila, produce una fibra natural que se extrae de la vaina de las hojas que rodean el tallo de la planta *Musa textiles* Née, pariente cercana del banano y originaria de Filipinas, que ha sido introducida en los trópicos húmedos americanos. Se usa principalmente para la producción de papeles especiales y se reportan más de 300 productos posicionados en el mercado a nivel mundial, siendo ampliamente conocidas las bolsas de té y filtros para café. Cada seudotallo debe cortarse en tiras, las cuales son raspadas en una máquina para remover la pulpa, conocida como “deco”. El contenido de lignina está por encima del 15%. El abacá es valorado por su gran resistencia mecánica, siendo una de las fibras más resistentes del mundo y que no sufren deterioro el por agua salada. Las tres empresas líderes a nivel mundial relacionadas con el consumo de la fibra del abacá son Glatfelter Gernsbach GmbH, Nippon Paper y Ahlstrom-Munksjo. Las tres tienen operaciones comerciales en Costa Rica y fueron recibidas dentro de la plataforma Descubre de PROCOMER y mantienen una operación de compra y exportación de toda la fibra que Costa Rica pueda proveer. En el caso específico de la empresa Nippon Paper Papylia Costa Rica, su participación en el proyecto del TEC se enmarca dentro de un interés con otras instituciones como INTA. INDER y Cenibiot para lograr una producción más sostenible de abacá. Se estima que el área actual de cultivos en Costa Rica

es de aproximadamente 500 has. Si se logra que Costa Rica extienda su área de cultivos, es factible la instalación de una planta de procesamiento primario y las exportaciones se harían de fibra procesada hacia otros países directamente. El presente proyecto ha generado información científica, y se sabe que la fibra de Costa Rica tiene propiedades superiores y diferentes a las de Ecuador y Filipinas, por lo que su uso está reservado para productos muy especializados. Además, se conoce que el rendimiento por unidad de área es superior en Costa Rica por el sistema de clasificación de las fibras. La problemática que justificó el proyecto propuesto por el TEC es la falta de conocimiento científico tecnológico sobre el cultivo de abacá y su comportamiento en sistemas agroforestales, ya que no se conocen en Costa Rica los usos que permitan darle mayor valor agregado al producto de exportación y abrir nuevos emprendimientos a nivel nacional. La falta de conocimiento puede resumirse de la siguiente manera:

- En Filipinas, donde es originario el abacá, el cultivo se maneja bajo sombra y hay investigaciones científicas que respaldan dicha afirmación. En Costa Rica, el manejo tradicional ha sido similar al cultivo del banano o plátano. Falta información técnica sobre el beneficio de incorporar árboles maderables con el propósito de incrementar el rendimiento, brindar sombra y mejorar el retorno de la inversión por la venta de madera a futuro, almacenamiento de carbono y otros beneficios ambientales.
- Actualmente hay mucha incertidumbre sobre el adecuado manejo de la semilla por la amenaza de Fusarium Raza 4, y se requiere caracterizar los cultivares que hay en el país para valorar resistencia y ofrecer semilla de la mejor calidad que incluya el cultivo *in vitro*
- No se conocen las necesidades nutricionales del cultivo ni las mejores prácticas compatibles con la mayor productividad.
- No se conocen usos alternativos a la fibra como biomaterial para un mayor valor agregado en el país ni el manejo de los residuos de la obtención de la fibra.
- No se dispone de conocimientos técnicos validados sobre el manejo de las plantaciones de abacá bajo modalidades en sistemas agroforestales.
- Hay grupos de productores en comunidades indígenas que requieren asistencia en producción de árboles, sistemas mejorados de almacenamiento de la fibra, transporte y secado.
- A nivel nacional es necesario incrementar las capacidades técnicas mediante un programa de capacitación interinstitucional dirigido a los productores, mostrando el uso adecuado de especies arbóreas.

5 Objetivos

El proyecto fue aprobado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión según acuerdo del Consejo de Investigación y Extensión acuerdo tomado por el Consejo de Investigación y Extensión en la Sesión Ordinaria No. 14-2019, Ronda 2020, Parte II, Artículo 21.8, del 7 de octubre del 2019 y consideró los siguientes objetivos:

5.1 Objetivo general

Generar información técnica y científica del componente forestal en asocio con el cultivo de abacá que contribuya al incremento de la capacidad productiva y de exportación de la fibra de abacá hacia mercados internacionales bajo principios de sostenibilidad ambiental.

5.2 Objetivos específicos

OE1. Evaluar el comportamiento fisiológico y el rendimiento del componente arbóreo en asocio con el cultivo de abacá bajo diferentes condiciones de sombra y régimen de manejo.

OE2. Obtener el protocolo óptimo para la propagación sexual y asexual del abacá para el suministro de semilla de calidad para los productores.

OE 3. Analizar el comportamiento de biomateriales a partir de plástico reciclado y reforzados con fibra de abacá.

OE 4. Transferir los conocimientos generados a productores y extensionistas de abacá a nivel nacional.

6 Métodos de investigación utilizados

Sobre los métodos de investigación seleccionados, se utilizó mayoritariamente el método cuantitativo, para la mayoría de los entregables se realizó una intervención de datos cuantificables o numéricos (medibles, escala continua), y se trabajó con universos de datos muy grandes (sobre los cuales tomaron muestras representativas como criterio de validación). Sobre estos datos se aplicaron diferentes métodos de análisis estadístico para ayudar a descubrir patrones y relaciones, así como a realizar generalizaciones y modelos matemáticos. Se utilizó la técnica del análisis de varianza para establecer diferencias estadísticas entre factores y tratamientos y se utilizó la prueba de Tukey para realizar las comparaciones múltiples a un nivel de significancia del $\alpha=0,05$. Todos los análisis fueron comprobados con el cumplimiento de la normalidad de los residuos del modelo del ANDEVA y la homocedasticidad de las varianzas. Otras técnicas utilizadas incluyeron análisis multivariado.

7 Marco Teórico

El abacá (*Musa textilis*) también conocido como “cañamo de Manila” es una especie nativa de Filipinas, diploide ($2n=20$), fértil, resistente a la Sigatoka negra y amarilla, no comestible ya que sus frutos tienen gran cantidad de semillas, pero de gran interés comercial por la excelente calidad de las fibras del seudotallo. Es una planta herbácea con una arquitectura similar a las plantas de banano y plátano; pero a diferencia de éstos su interés lo constituye el seudotallo. Son plantas de porte alto (5-8 m) de seudotallo más delgado, hojas más pequeñas, angostas y verticales que sus parientes bananos y plátanos (Jones, 2000). Aunque el abacá tiene frutos con semillas viables, en Costa Rica no ha sido posible obtener plantas por semilla; por lo tanto, el material de plantación consiste principalmente de

hijuelos, cormos completos o partes de estos que posean una yema vegetativa, siendo también posible la propagación *in vitro* (Aguilar et al.; 2011).

Durante el siglo XIX, el abacá fue ampliamente usado en aparejos de barcos y la pulpa era usada para hacer sobres resistentes de papel manila. Su uso comenzó a decrecer con la intensificación de la fabricación de polímeros sintéticos durante la segunda guerra mundial (Abonal, 2006). Aún hoy en día se emplea para hacer sogas, bramantes, cordeles, líneas de pesca y redes, así como tela para sacos. También está creciendo el nicho de mercado especializado en ropa, cortinas, pantallas y tapicería de abacá, pero actualmente el uso principal de la fibra es para hacer papel de alta calidad y de usos muy especiales en el mercado mundial como las bolsas de té y filtros de todo tipo (Vijayalakshmi et al.; 2014). Con las políticas que están adoptando los países para reducir el daño ambiental global del uso de los polímeros sintéticos, las fibras naturales vuelven a cobrar importancia y un nuevo desarrollo (Ramli et al., 2018).

La mayor parte de la fibra de abacá se transforma en pasta y en papeles especiales, tales como bolsas de té y café, papel para envoltura de salchichas, billetes (algunos contienen un 30 por ciento de abacá), papeles para cigarrillos, medicamentos, alimentos, desechos, papel de alta calidad para escritura, bolsas para aspiradoras, etiquetas metálicas, envoltura de transistores, entre otros. Actualmente se está usando el abacá para aplicaciones 'blandas' en la industria automotriz, como material de relleno para cojines, asientos. Pero, dada su gran resistencia a la tensión, también puede usarse para aplicaciones 'más duras', para componentes exteriores, como sustituto de la fibra de vidrio en componentes de plástico reforzados. La Mercedes Benz ha usado una mezcla de polipropileno termoplástico e hilaza de abacá en partes del cuerpo de los automóviles. La sustitución de las fibras de vidrio con fibras naturales puede reducir el peso de las partes del automóvil y facilita una producción más respetuosa del medio ambiente y el reciclado de sus partes. Debido a la resistencia mecánica extremadamente elevada de la fibra, así como a su longitud, la aplicación del abacá incluso en componentes muy expuestos ofrece un gran potencial para diferentes aplicaciones industriales (Netravali & Chabba, 2003; Evans, 2019).

Costa Rica introdujo el cultivo del abacá desde 1941, en tiempos en los que el mundo entero enfrentaba las consecuencias de la segunda guerra mundial. En aquellos inicios, en la región de Bataan, Matina se dio un fuerte fomento al cultivo, 1500 casas albergaban a los trabajadores y se llegó a una extensión cercana a las 4200 hectáreas. La exportación de la fibra posicionó a Costa Rica como exportador mundial y la actividad se mantuvo poco más de 7 años y se contrajo cuando el mundo conoció el nuevo desarrollo de la fibra sintética conocida como el nailon, todo desapareció menos las casas que pueden observarse en el siguiente video https://www.teletica.com/masqn/casas-con-historia-las-casas-del-abaca_203249

Sin embargo, actualmente la industria de fibras de abacá está en expansión y grandes cantidades están siendo necesarias para suplir la demanda a una escala internacional. La industria, especialmente del sector de la fabricación de automóviles, que es un usuario enorme de materiales a granel, busca tener un centro de re inserción social de materiales de vida razonablemente larga que se degraden e incorporen de nuevo en el ambiente cuando ya no son necesarios. Plásticos reforzados a base de las sustancias naturales, principalmente derivadas de plantas, son prometedoras para proporcionar esto y pueden resultar en poco tiempo en una de las revoluciones de biomateriales de este siglo. La industria automotriz está a la cabeza de los compuestos 'verdes' porque es aquí donde la necesidad es mayor. Frente a las presiones para producir vehículos eficientes en el consumo de combustible y de baja

contaminación, la industria se ha visto obligada a utilizar compuestos de plástico reforzado con fibra para aligerar sus productos. Pero la producción de los compuestos sintéticos es muy intensiva en el uso de energía y genera mucha contaminación y acá las fibras de abacá tienen un papel muy importante (Ramli et al., 2018).

Filipinas y Ecuador siguen siendo los líderes mundiales en la producción de fibra de abacá. Sin embargo, al igual que Costa Rica todavía utilizan prácticas de cultivo rústicas, generalmente sin fertilización y sin tecnificación agrícola. Además de tener condiciones climáticas menos favorables con una estación seca de por lo menos 5 meses, y donde las fincas carecen de riego provocando un bajo rendimiento del cultivo. Comparativamente, el Caribe de Costa Rica ofrece algunas ventajas para la producción de abacá con respecto a estos países, entre ellas, una mejor distribución de las lluvias a lo largo del año y un mayor acceso a la tecnología agrícola. Estos factores han permitido que en Costa Rica se logren rendimientos superiores a los alcanzados por los países líderes del mercado mundial. La mayoría de los productores son familias campesinas, que pueden obtener una rentabilidad bruta por hectárea que supera los \$ 4,000 anuales. Los principales cultivares utilizados son ‘Maguindinao’, ‘Tangongon’ y ‘Bungalanon’ (Aguilar et al.; 2011).

Además de Filipinas que es el mayor productor mundial, diversos estudios hacen referencia a que este cultivo y el manejo diversificado en sistemas agroforestales, puede representar importantes repercusiones socioeconómicas ya que constituye un medio de vida para muchos productores de pequeña escala, especialmente en países como Costa Rica (Rodríguez et al. 2019). El abacá es un cultivo de sombra con un buen potencial para ser integrado en sistemas agroforestales (Lacuna-Richman, 2002), ya que ofrece fuentes de ingresos adicionales por venta de madera. (Dargantes, 1996) y previene la erosión del suelo (DENR, 1997), ya que el abacá posee grandes hojas que absorben parte de la energía cinética de las gotas de lluvia, lo que a su vez reduce el impacto directo sobre la superficie del suelo (Pattison et al., 2003). Además, las plantas de abacá forman un sistema adventicio de raíces que se extiende ampliamente, no tiene ramas, es poco profundo y da lugar a una densa capa de raíces que estabiliza mecánicamente el suelo (Lacuna-Richman, 2002; Armecin y Gabón, 2008; Armecin et al., 2011). Al integrar el abacá en sistemas agroforestales multiestratos, hay que considerar la interceptación de la radiación y la eficiencia con la que se utiliza la energía de la radiación para producir fotosíntesis, ya que esto juega un papel crucial en el crecimiento de los rodales de cultivos arbóreos (Balster y Marshall, 2000; Will et al., 2001; Allen et al., 2004; Kemanian et al., 2004). Normalmente, el sombreado reduce la fotosíntesis, la transpiración y la división de la biomasa de las partes vegetativas en partes económicas (Akhter et al., 2009). Sin embargo, las adaptaciones morfológicas y fisiológicas de la especie tienden a ocurrir en respuesta a la variación de la radiación solar para mantener la máxima eficiencia fotosintética de las hojas (Duriyaprapan y Britten, 1982). Varios estudios han demostrado que cualquier tipo de sombra reduce la productividad (Copeland, 1911; Stover, 1984; Israeli et al., 1994; Stanhill y Cohen, 2001; Akhter et al., 2009), mientras que otros han encontrado que la productividad de los cultivos aumenta bajo una sombra moderada (Boardman, 1977; Björkman y Holmgren, 1966; Holmgren, 1968; Batugal et al., 1977; Raveh et al., 2003; Isaac et al., 2007; Saifuddin et al., 2010).

Los experimentos realizados en CATIE han permitido explorar el potencial de la micropropagación y de las técnicas de regeneración celular para la multiplicación del abacá, especie en la que aún no hay estudios publicados en el tema. La respuesta observada en la inducción de la embriogénesis somática y organogénesis adventicia en abacá constituyen informaciones novedosas y de gran relevancia científica. Los logros obtenidos hasta el momento muestran el enorme potencial para el desarrollo de

nuevos sistemas de multiplicación que permitirán en el corto plazo el suministro adecuado de material de siembra con la calidad requerida por el productor (Aguilar et al.; 2011). Los aspectos de plagas y enfermedades han sido estudiados en reportes de la Estación Experimental Los Diamantes del INTA; sin embargo, falta caracterización y mayores estudios por la susceptibilidad potencial a *Fusarium* Raza 4.

8 Metodología

Metodología para el OE1. Evaluar el comportamiento fisiológico y el rendimiento del componente arbóreo en asocio con el cultivo de abacá bajo diferentes condiciones de sombra y régimen de manejo

8.1.1 Descripción del sitio y especies

El estudio se llevó a cabo en una finca incorporada a la Asociación de Productores de *M. textilis* y Cultivos Agroforestales (ASPA) ubicada en el caserío La Chávez en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23'01.6 "N, 83°56 '36.1"W, 68 msnm). El sitio presenta un clima de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1978); con una precipitación promedio anual de 4062 mm y una temperatura promedio anual de 25,9 °C (Climate-Data, 2019). El suelo se clasifica dentro del orden Ultisol y Suborden Humults, (Ortiz & Soto, 2014), con un pH ácido menor a 5,5, una saturación de acidez del 40% y pendiente muy leve (< 5%). Las componentes del experimento fueron, la musácea *M. textilis* Née (abacá) y las especies maderables *C. alliodora* (laurel), *D. panamensis* (almendro) y *H. alchorneoides* (pilón); cada uno con una arquitectura de follaje y crecimiento diferente. La nomenclatura y las autoridades se basan en The Plant List (2013) generada por el Missouri Botanical Garden (www.theplantlist.org).

El establecimiento se hizo en dos etapas; primeramente, se sembró el *M. textilis* en julio de 2020 con una densidad de 1600 plantas ha⁻¹ y posteriormente se sembraron los árboles en octubre de 2020 entre las hileras de *M. textilis* con una densidad de siembra de 400 árboles ha⁻¹. Durante la siembra de los árboles, a cada individuo se le aplicó 40 g de Hidrokeeper® para prevenir el déficit hídrico en los meses de enero hasta abril. Previo a la siembra, se realizó un mecanizado uniforme del terreno con una rastra de discos a 60 cm de profundidad; en la cual, se aplicó 1 ton ha⁻¹ de carbonato de calcio (CaCO₃) para reducir la acidez a valores < 10%, evaluada con muestreos de suelos. En cuanto a operaciones silvícolas post-siembra, se realizó una fertilización a los tres y ocho meses de edad, con una fórmula NPK (10-30-10) con dosis que varían según el estado nutricional del experimento y la competencia con arvenses se controló bimensualmente de forma mecánica mediante el uso de una desbrozadora (2,5 Hp de potencia). El paquete de manejo consistió en el uso mínimo de plaguicidas.

8.1.2 Diseño experimental

Se aplicó un diseño experimental completamente al azar con tres tratamientos, correspondientes a las especies maderables en estudio. Los tratamientos se designaron como Testigo = *M. textilis* en monocultivo, Ca = *M. textilis* y *C. alliodora*, Dp = *M. textilis* y *D. panamensis*, y Ha = *M. textilis* y *H. alchorneoides*. Cada parcela está compuesta por 12 árboles y 36 plantas de *M. textilis*, en donde cada árbol se ubica al centro de cuatro plantas de *M. textilis*. Adicionalmente, en cada parcela se definió una fila externa de seis plantas de *M. textilis* como control de borde.

8.1.3 Tiempo de estudio y condiciones experimentales

Se aplicaron mediciones mensuales en el periodo de enero a octubre de 2021; en donde, se evaluaron parámetros dasométricos y fisiológicos de ambos componentes del SAF. Para esto, por cada árbol muestreado en la parcela, se escogió la cepa de *M. textilis* más representativa del cuadrante para realizar las mediciones pertinentes en las plantas.

El muestreo fisiológico se ejecutó considerando únicamente hojas de la parte intermedia de la copa de los individuos, caracterizadas por no poseer defectos o decoloraciones atípicas visibles, así como por no presentar zonas con agua superficial; ya que esto puede provocar distorsiones en los datos. Todas las mediciones, se aplicaron siempre fuera del área efectiva de la nervadura. Estos muestreos se ejecutaron entre las horas de 8:00-10:00 y de 14:00-16:00 (GMT-6 América Central) para garantizar que los valores máximos se determinaran previo al posible cierre estomático del mediodía, llevando un control paralelo de las condiciones de temperatura (°C), humedad relativa (%) y luminosidad; para minimizar las variabilidades extremas que pudieran afectar de forma directa a la toma de datos.

8.1.4 Parámetros dasométricos

Se evaluó el crecimiento vertical de los individuos, mediante la medición la altura total en el caso de los árboles; y la altura total del seudotallo más grueso en las cepas de *M. textilis* medida hasta el punto de inserción de la hoja bandera.

8.1.5 Parámetros fisiológicos

En cuanto a los parámetros fisiológicos se midieron las variables, SPAD, asimilación fotosintética (A_n , $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), transpiración (E , $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), conductancia estomática (g_s , $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), eficiencia instantánea del uso del agua ($iWUE$, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$) y déficit de presión de vapor (VPD, kPa).

Los niveles de clorofila se evaluaron aplicando cinco mediciones mensuales por hoja para tres hojas por individuo, utilizando un medidor de clorofila SPAD-502Plus (Konica Minolta®, Soil Plant Analysis Development) de área efectiva igual a 5 mm^2 . Las variables conductancia estomática (g_s), tasa fotosintética neta de CO_2 (A_n), transpiración (E), eficiencia instantánea del uso del agua ($iWUE = A / E$) y déficit de presión de vapor (VPD), se evaluaron en el mes 18 de edad de las plantas, aplicando una medición en una hoja a tres árboles y tres plantas por parcela, con un analizador de fotosíntesis portable modelo CIRAS-III (PP Systems®, USA) con una cubeta de hoja universal PCL-3, calibrado a un flujo constante de CO_2 de 380 ppm (Valverde & Arias, 2020b). Previo a las mediciones, se realizó una calibración aplicando el procedimiento de estabilización del equipo según instrucciones del fabricante, que se logra al obtener un diferencial de CO_2 igual $0 \pm 0,5 \text{ mb}$.

8.1.6 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio con análisis de varianza a los datos correspondientes a las mediciones fisiológicas tomadas con el instrumento CIRAS III. Para ello, se verificaron los supuestos de normalidad y de homocedasticidad de las varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y de Levenne, respectivamente. Posteriormente, se aplicó el ANOVA con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre tratamientos, y en caso de ser necesario se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey para determinar diferencias estadísticas entre medias. En las situaciones en las que se incumplió con los supuestos, se procedió a ejecutar la prueba no paramétrica Kruskal Wallis junto a una comparación de medianas, en caso de encontrar diferencias significativas. Todo lo anterior, se analizó en el software Infostat v. 2020e (Di Rienzo et al., 2020) con una significancia de 0,05.

8.2 Metodología para actividades del OE2. Extracción de ADN para caracterización molecular de variedades de abacá

En esta sección se presenta la metodología para el estudio e identificación de los diferentes cultivares que dispone el país para su caracterización molecular y características de campo.

8.2.1 Sitios de muestreo

Las actividades de muestreo se desarrollaron con la colaboración de personal de Nippon Paper y con la facilitación del material genético del INTA en la Estación Experimental Los Diamantes. De igual manera se contó con todas las facilidades del CATIE y su colección de materiales en finca La Lola en Matina. Adicionalmente se han colectado materiales en fincas que se destacan por su productividad o características especiales. El muestreo consideró partes foliares sanas que fueron colectadas y transportadas en bolsas con sílica gel.

8.2.2 Extracción de ADN

Se colectó al menos una planta por cada variedad en estudio y se le realizó el aislamiento de ADN. Se utilizó el Kit de extracción de ADN Wizard de Promega (https://worldwide.promega.com/-/media/files/resources/protocols/technical-manuals/0/wizard-genomic-dna-purification-kit-protocol.pdf?rev=776154d180fe4b41a0a3dc8a9e328c8a&sc_lang=en).

Se utilizó el material de las diferentes colecciones y que presumiblemente representan diferentes variedades y que fue almacenado en una desecadora para asegurar un ambiente limpio y seco.

Debido a que las características propias del abacá, se adaptó el protocolo con los siguientes pasos.

1. Procesamiento del tejido foliar: Se utilizó nitrógeno líquido para congelar el material, seguido de su trituración en un fino polvo utilizando un mortero y mazo o un pestillo de microcentrífuga. Se añadieron aproximadamente 30 mg de este polvo de hoja a tubos de microcentrífuga de 1.5 ml.
2. Adición de Solución de Lisis de Núcleos: Se incorporaron 600 μ l de Solución de Lisis de Núcleos y se agitaron durante 1-3 segundos para humedecer el tejido. La muestra se incubó a 65°C durante 15 minutos.

3. RNasa y Mezcla: Se añadieron 3 μ l de Solución de RNasa al lisado celular y se mezcló el contenido mediante inversión del tubo 2-5 veces. Se incubó la mezcla a 37°C durante 15 minutos y luego se permitió que se enfriara a temperatura ambiente durante 5 minutos antes de continuar.
4. Precipitación de Proteínas: Se incorporaron 250 μ l de Solución de Precipitación de Proteínas y se agitaron vigorosamente a alta velocidad durante 20 segundos. Se centrifugó a 4°C durante 5 minutos a 8,000 \times g para formar un sólido pellet de proteínas.
5. Transferencia del Sobrenadante: Con cuidado, se transfirió el sobrenadante que contiene el ADN (dejando atrás el pellet de proteínas) a un nuevo tubo de microcentrífuga de 1.5 ml, al cual se le añadieron 600 μ l de isopropanol a 4°C. Se recomendó dejar el líquido residual en el tubo original para evitar contaminar la solución de ADN con proteínas precipitadas.
6. Formación de Hebras de ADN: Se mezcló la solución suavemente por inversión hasta que se formaron hebras de ADN visibles.
7. Centrifugación y Eliminación del Sobrenadante: Se centrifugó durante 3 minutos a 4°C a 5000 \times g y se eliminó con cuidado el sobrenadante.
8. Lavado del ADN: Se lavó el ADN con 600 μ l de etanol al 70% a 4°C, invirtiendo el tubo varias veces. Se centrifugó durante 3 minutos a temperatura ambiente a 5 000 \times g.
9. Eliminación del Etanol: Con precaución, se eliminó el etanol utilizando una pipeta Pasteur o una punta de pipeta de secuenciación, dado que en este punto el pellet de ADN es muy laxo.
10. Secado del Pellet de ADN: Se invirtió el tubo sobre papel absorbente limpio y se permitió que el pellet de ADN se secara al aire durante 15 minutos.
11. Rehidratación del ADN: Se añadieron 100 μ l de Solución de Rehidratación de ADN e se incubó a 65°C durante 1 hora, con agitación periódica mediante golpeteo suave del tubo. También se permitió la rehidratación durante la noche a temperatura ambiente o a 4°C.
12. Almacenamiento: Se almacenó el ADN a 2–8°C para su posterior análisis y estudio.

Nota: Todo el protocolo se trabajó en frío, incluyendo las centrifugaciones (4 °C) y se agregó el isopropanol y el etanol 70% fríos.

8.2.3 Protocolo de PCR

Se utilizaron los marcadores SSR mencionados en el Cuadro 1 y el programa de termociclado de la Figura 1, cambiando la temperatura de anillamiento para cada primer, ya que el termociclador permite variar esta temperatura según el carril en el que se encuentran las muestras. Además, se prepararon reacciones de 30 μ l, según fuera la necesidad (Tabla 2).

Tabla 2. Marcadores SSR utilizado para la identificación de genotipos de abacá.

Nombre del SSR	Tamaño máximo	Forward	Reverse
R07	165	AACAACCTAGGATGGT AATGTGTGGAA	GATCTGAGGATGGT TCTGTTGGAGTG
R39	400	AACACCGTACAGGG AGTCAC	GATACATAAGGCA TCACATTG
R40	540	GGCAGCAACAACAT ACTACGAC	CATCTTCACCCCAT TCTTTTA
R45	275	TGCTGCCTTCATCGCT ACTA	ACCGCACCTCCACC TCCTG
R150	270	ATG CTG TCA TTG CCT TGT	GAA TGC TGA TAC CTC TTT GG
R231	286	GCA AAT AGT CAA GGG AAT CA	ACC CAG GTC TAT CAG GTC A
R264	274	AGG AGT GGG AGC CTA TTT	CTC CTC GGT CAG TCC TC

 Tabla 3. Componentes de la reacción de PCR de 30 μ l

Componente	Cantidad (μ l)
Master Mix 2X	15
Primer (F)	2
Primer (R)	2
H2O	8
ADN	3

Total	30
-------	----

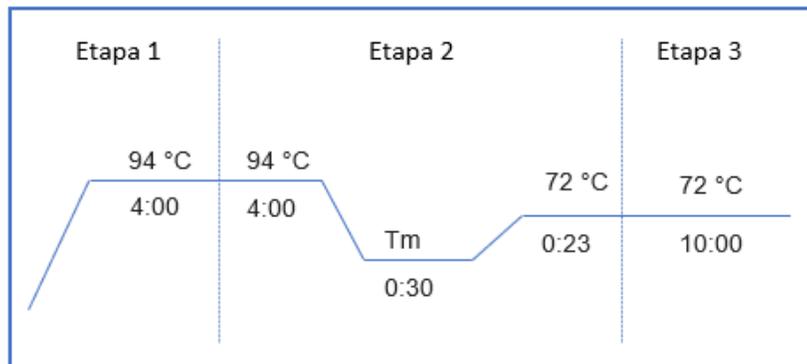


Figura 1. Ciclo de termociclado utilizado en el proyecto para las muestras de abacá.

8.2.4 Optimización de la temperatura de anillamiento (T_m) de cada marcador

Se utilizaron los marcadores SSR mencionados en el cuadro 1 y el programa de termociclado de la figura 1, cambiando la temperatura de anillamiento para cada *primer*. Para cada set de *primers* se utilizaron las siguientes temperaturas en el paso del anillamiento: 51°C, 53°C, 55°C, 57°C, 59°C y 61°C.

8.2.5 Electroforesis

Preparación del Gel: Se preparó un gel de agarosa al 1.5% en Buffer TAE 0.5X sin añadir Gel Red.

Carga del Gel: Las muestras de PCR (5ul) se mezclaron con Buffer de carga 6X (con gel red) y se cargaron en el gel junto con el marcador molecular.

Electroforesis: Se llenó la cámara de electroforesis con Buffer TAE 0.5X, se conectó a la fuente de poder eléctrico y se ajustó a 90V durante 1 hora.

8.2.6 Electroforesis capilar acoplada a fluorescencia

Se le solicitó el servicio al CIBCM de la Universidad de Costa Rica utilizando el equipo QIAxcel, para realizar esta corrida.

Preparación de las muestras de PCR de Abacá: Las muestras de PCR de abacá, que contenían los productos amplificados del ADN de interés, se prepararon y cuantificaron previamente para asegurar una concentración y pureza adecuadas.

Dilución de las Muestras: Las muestras de PCR se diluyeron según las recomendaciones del protocolo de electroforesis capilar del equipo QIAxcel.

Carga de Muestras en el Equipo: Las muestras de PCR diluidas se cargaron en las placas específicas del equipo QIAxcel, siguiendo las indicaciones del software para la disposición adecuada de las muestras y marcadores.

Selección del Método y Parámetros: En el software QIAxcel, se seleccionó el método de análisis adecuado para muestras de PCR, que incluía información sobre el rango de tamaño de fragmentos a analizar y otros parámetros específicos.

Inicio de la Electroforesis: Una vez configurados los parámetros, se inició la electroforesis en el equipo QIAxcel. Durante este proceso, las muestras se introdujeron en el capilar lleno de gel y se sometieron a un campo eléctrico, lo que permitió la migración de los fragmentos de PCR a lo largo del capilar.

Detección Fluorescente: Como en el protocolo estándar, la detección fluorescente fue esencial. A medida que los fragmentos de PCR pasaron por la ventana de detección en el capilar, se iluminaron con una luz láser y emitieron fluorescencia en proporción a su tamaño y fluorescencia.

Análisis de Datos: El software QIAxcel procesó y analizó los datos de fluorescencia para generar un perfil de separación de los fragmentos de PCR. Esto incluyó la determinación de tamaños y concentraciones de los fragmentos.

8.3 Metodología para actividades del OE2. Obtener el protocolo óptimo para la propagación asexual *in vitro* del abacá para el suministro de semilla de calidad para los productores

Para desarrollar el protocolo de cultivo *in vitro* para abacá se procedió a realizar diferentes visitas a colecta de material. Se seleccionaron cepas y los hijos viables para la introducción de materiales en el laboratorio. Se transportó material tipo cormo y se dejaron directamente al sol por varios, esto debido a la alta carga de contaminación que trae este tipo de material. En el laboratorio se eliminaron las partes del cormo y las vainas foliares hasta obtener segmentos de 3 a 5 cm que encierren ápices (segmentos), los cuales fueron utilizados como explantes. Los detalles de los procedimientos subsiguientes forman parte del protocolo que se presenta en la sección de resultados.

8.4 Metodología para actividades del OE3. Caracterizar física y químicamente la fibra en función de sitio, cultivares y el estado de madurez

8.4.1 Genotipos evaluados y procedencia del material

Los genotipos evaluados en este estudio se identificaron como MT01, MT03, MT07, MT11 y CF01; y se caracterizan por tener altos niveles de producción a nivel de plantación piloto, así como por su calidad comercial según el estándar nacional de venta.

MT01, MT03 y MT07 corresponden a material cosechado de una plantación perteneciente al Instituto de Transferencia Agropecuaria de Costa Rica (INTA) ubicado en Guápiles, Limón, Costa Rica (10°15'N, 83°46'W); que se encuentra a una altitud de 825 m, y presenta una temperatura media anual de 22,2 °C y una precipitación media anual de 3362 mm (Climate-Data, 2019), con una estación lluviosa de mayo a diciembre y una estación seca de enero a abril. El sitio exhibe una topografía plana con suelos de tipo

Inceptisol (Ortiz et al., 2014) dominante en arcillas y limos, con infiltración aceptable y un pH de 5,5 con las condiciones nutricionales recomendables para el desarrollo de la especie (niveles de nitrógeno, fósforo y potasio) (Göltenboth & Mühlbauer, 2010). Mientras que MT11 y CF01 corresponden a material de plantaciones comerciales situadas en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23' N, 83°56' W); que presenta una precipitación media anual de 2996 mm y una temperatura media anual de 22 °C (Climate-Data, 2019); con suelos del tipo Ultisol (Ortiz et al., 2014) con pH ácido menor a 5,5 y una saturación de acidez del 40%.

8.4.2 Obtención de las fibras

De cada genotipo, se seleccionaron cinco plantas en etapa de floración con dimensiones medias de cosecha según el genotipo. Los seudotallos fueron intervenidos por medio de la técnica de desfibrado de Gölthenboth et al. (2010) por trituración mecánica. Posteriormente, se aplicó una categorización para primera y segunda calidad de la fibra (parámetro: coloración); con el fin de seleccionar para el estudio únicamente el material de primera calidad. Dicho material, se secó a 60 °C por un periodo de 72 h hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al $20 \pm 2\%$.

8.4.3 Caracterización de la fibra

8.4.3.1 Propiedades anatómicas

Se analizaron 18 filamentos de fibra por genotipo de 10 mm de longitud, en un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo TM3000 (Hitachi High Technology Copr., Tokio, Japón). Cada filamento de fibra se fotografió en su cara transversal con un aumento óptico de 300X y 400X en el lado transversal. Posteriormente, se determinó el diámetro, área y grosor medio del lumen celular y el porcentaje de espacio vacío dentro de las fibras; con el software Image J v. 2.44 (Ferreira & Rasband, 2012).

8.4.3.2 Propiedades físico-mecánicas

Se evaluaron las propiedades físicas, contenido de humedad en condición verde y seca, colorimetría, absorción de agua y densidad.

Para estimar el contenido de humedad en condición húmeda y seca (%), se utilizaron 3 g de fibra por genotipo en una termobalanza Ohaus modelo MB45 (OHAUS, Newark, NJ, USA). El análisis colorimétrico se implementó aplicando la metodología propuesta por Valverde et al. (2020); en donde, se analizaron cuatro muestras de 5 g por genotipo en un espectrofotómetro estandarizado de cromatografía CIE NIX Pro (Nix sensor Ltd., Hamilton, ON, Canadá); en formato CIELab que generó tres parámetros para explicar el color: L* (luminosidad), a* (tendencia del color del rojo al verde) y b* (tendencia del color del amarillo al azul). El color se determinó en el rango de 400 a 700 nm con un puerto de medición de 10 mm de diámetro; y la medición de la componente especular incluida (modo SCI) se ejecutó con un ángulo de 10°, típico de la superficie heterogénea (D65/10), con un D65 (correspondiente a la luz del día a 6500 K).

La determinación de la capacidad de absorción de agua se evaluó según lo descrito en la norma ASTM D570-22 (2022); en donde, tres muestras de 2 g por genotipo fueron secadas a 105 °C durante 72 h. Posteriormente, las muestras se pesaron y se colocaron en agua destilada y se pesaron cada 24 h por un periodo de 240 h. Asimismo, la densidad de la fibra se determinó bajo la norma ASTM D1577-07(2018); en donde, se utilizaron 18 filamentos por genotipo.

En cuanto a las propiedades mecánicas, se ensayó a esfuerzo de 30 filamentos de fibra de 300 mm de longitud por genotipo; a los cuales, se les colocó un aditamento de madera que para prensar las fibras en una máquina de ensayo universal Tinius Olsen modelo H10 KT (Tinius Olsen TMC, Pasadena, CA, USA); según lo descrito en la norma ASTM D3822M-14 (2020). La máquina se programó a una velocidad de 14 mm min⁻¹.

8.4.3.3 Propiedades químico-energéticas

Se evaluaron las propiedades químicas: contenido de lignina según la norma TAPPI T222 om-02 (2002) y holocelulosa siguiendo la metodología propuesta por Seifert (1960); así como, extractivos en agua fría y caliente según la norma ASTM D1110-21 (2021), extractivos en NaOH al 1% según ASTM D1109-21 (2021), extraíbles con diclorometano según ASTM D1108-21 (2021), extractivos con etanol-tolueno según ASTM D1107-21 (2021), contenido de cenizas según ASTM D1102-84 (2021), el contenido de volátiles según la prueba ASTM D1762-84 (2021), el carbono fijo según la norma ASTM D3172-13e1 (2021) y el poder calórico según la norma ASTM D5865/D5865M-19 (2019). Asimismo, se estimó el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) con un analizador Elementar modelo Vario Micro Cube (Elementar, Langensfeld, Alemania).

La estabilidad térmica de las muestras se evaluó mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA) siguiendo la metodología propuesta por Sebio-Puñal et al. (2012), en un analizador modelo SDT Q600 (TA Instruments, New Castle, DE, EE. UU.). Las muestras de 7,5 g de fibra se programaron para un barrido en una rampa de calentamiento de 20 a 800 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C mm⁻¹, en una atmosfera inerte de nitrógeno constante de 100 ml min⁻¹. Todos los análisis descritos se evaluaron por triplicado según el genotipo.

8.4.4 Diferenciación entre genotipos y recomendaciones de uso

La diferenciación entre genotipos se identificó utilizando el set de datos completo obtenido en la caracterización de las fibras, mediante la aplicación de un análisis multivariante con el método divisivo para identificar la similitud entre genotipos y determinar las propiedades características que generan esa distinción. Como consiguiente, se compararon las propiedades promedio de cada grupo de genotipos obtenido con los valores reportados por Armecin et al. (2011), del Río & Gutiérrez (2006), Narayana & Rao (2021), Muthu & Gardetti (2020), Girones et al. (2011), Saragih et al. (2018), Saragih et al. (2020), y Reed & Williams (2004) para la producción de diferentes productos de fibra natural. Como resultado, se establecieron tres categorías de uso probable: alto (propiedades óptimas para su uso), medio (propiedades compatibles; pero no son ideales) y mínimo (propiedades poco compatibles).

8.4.5 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio con análisis de varianza. Previo a cualquier análisis, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. Posteriormente, se ejecutó el ANOVA para cada variable analizada con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre genotipos; y en caso de ser necesario, se aplicó la prueba de Tukey para identificar diferencias entre medias. Asimismo, se aplicó un análisis multivariante con el paquete FactoMineR v. 2.4. Todos los análisis se realizaron en el programa R v. 4.2.1. (Makosso-Kallyth & Diday, 2022), con una significación de 0,05.

8.5 Metodología para actividad del OE3. Caracterización de tableros de partículas de *Gmelina arborea* roxb. reforzados con fibra de *Musa textilis* née

8.5.1 Procedencia del material

La materia prima utilizada en la fabricación de los tableros compuestos corresponde a partículas de fibra de *M. textilis* y madera de *G. arborea*. La madera se obtuvo de una industria maderera local; mientras que la fibra de *M. textilis* se cosechó en una plantación comercial en etapa de floración ubicada en Horquetas de Sarapiquí, Limón, Costa Rica (10°23' N, 83°56' W). Dicho sitio se caracteriza por presentar una precipitación media anual de 2996 mm y una temperatura media anual de 22 °C (Climate-Data, 2019); con suelos del orden Ultisol (Ortiz et al., 2014) con un pH ácido promedio menor a 5,5 y una saturación de acidez del 40%.

8.5.2 Proceso de fabricación de los tableros prensado

La fibra de *M. textilis* se fraccionó en una trituradora industrial para plástico, mientras que la madera de melina se trituró en una chipeadora modelo DPM-2 con 10 HP y 3700 RPM. Una vez fraccionados, ambos materiales fueron cribados manualmente en un tamiz de malla N° 50; con el fin de obtener partículas con dimensiones promedio de 5 ± 2 mm de largo para *M. textilis*, y 2 ± 1 mm de ancho/espesor con 5 ± 2 mm de largo para la especie *G. arborea*. El material procesado se secó a 50 ± 2 °C por un periodo de dos semanas, hasta alcanzar un contenido de humedad en equilibrio de alrededor del $4 \pm 1\%$. En cuanto a la fabricación, los tableros consistieron en una sola capa con dimensiones de 350 x 350 x 12 mm y una densidad estándar objetivo de 0,65 g cm⁻³. Se utilizó el adhesivo disponible en el país y facilitado por una de las industrias dedicadas a la fabricación de tableros; el cual corresponde al adhesivo Melamina Urea Formaldehído (MUF) con su respectivo catalizador (AkzoNobel 1247/2526, AkzoNobel Wood Coatings, USA), con una carga de adhesivo del 12% basado en el peso seco de las partículas en una relación 5:1 (adhesivo: catalizador) según instrucciones de la casa fabricante. La viscosidad de dicho adhesivo se caracterizó por presentar un valor promedio de 17500 MPa y un pH de 9,5 a 10,7 (todos los valores a 25 ± 2 °C).

Las proporciones de partículas de *G. arborea* (M) y *M. textilis* (A), utilizadas para la conformación de la matriz se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de fibras y residuos de madera utilizados en los experimentos

Tratamiento	Relación M:A
T1	40:60
T2	60:40
T3	50:50

T4 *	100:0
T5	0:100

Nota: Relación M:A (*G. arborea*: *M. textilis*). Tratamiento destacado con (*) corresponde al tratamiento testigo (n=10).

Se utilizó una batidora rotatoria industrial para homogenizar la mezcla encolada de partículas. Una vez obtenida la mezcla impregnada, esta se manipuló manualmente en un molde de madera previamente parafinado; y posteriormente se procedió a aplicar un pre-prensado a temperatura ambiente (24 ± 1 °C) en una prensa manual de fabricación local por un periodo de 5 min.

Una vez desmoldado, se aplicó el método de prensado en caliente con una prensa hidráulica con capacidad de carga de 8000 kg; aplicando una fuerza de 6,5 kg cm⁻¹ por 15 min a 140 °C, para acelerar el curado del adhesivo. Se utilizaron dos barras distanciadoras de acero de 12 mm de espesor para controlar el grosor del material compuesto. Los tableros se acondicionaron en una cámara de control ambiental a una temperatura de 22 ± 2 °C al $65 \pm 1\%$ de HR, durante tres semanas hasta alcanzar un contenido de humedad constante. Se fabricaron un total de 10 réplicas por tratamiento en las mismas condiciones; para un total de 50 tableros.

8.5.3 Caracterización de los tableros

La selección de probetas se acondicionó según lo descrito en la norma ASTM D4933-16 (2021). En cada una de las propiedades evaluadas se fallaron un total de 10 unidades muestrales por tratamiento; las cuales se describen a continuación:

8.5.3.1 Propiedades físicas

Se evaluó la densidad al 12% (D12) siguiendo el método B descrito en la norma ASTM D2395-17 (2022) y el contenido de humedad (CH12) usando el método A de la norma ASTM D4442-20 (2020). Se estimó la absorción de agua (WA) e hinchamiento en espesor (TS) según el método B de la norma ASTM D1037-12 (2012); en el cual, se realizó una secuencia de mediciones durante 96 h con periodos de inmersión cada 24 h, entre los cuales se midieron las variables peso y espesor, con una balanza analítica con error de $\pm 0,05$ g y un calibrador digital en mm, respectivamente. Se evaluó también el hinchamiento en espesor por absorción de humedad basado en los cambios del contenido de humedad del 12 al 18% (HE Δ) según la norma ASTM D4933-16 (2021), modificada para las condiciones ambientales de Costa Rica, siguiendo la metodología propuesta por Moya et al. (2022).

8.5.3.2 Propiedades mecánicas

Se evaluó la tensión perpendicular a la superficie (IB) y la dureza (H); así como flexión estática (SB) y tensión paralela a la superficie (TI). Todas las propiedades, se determinaron según la norma ASTM D1037-12 (2020) en una máquina de pruebas universal Tinius Olsen (Modelo H10 KT Tinius Olsen TMC, Pasadena, CA, USA).

Asimismo, se verificó que los resultados obtenidos en las propiedades físico-mecánicas testeadas, cumplieran con los rangos mínimos establecidos por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares según el estándar ANSI A208.1-1999 (1999).

8.5.3.3 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio mediante un análisis de varianza, para lo cual se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y la homocedasticidad de las varianzas con las pruebas Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. El ANOVA aplicado consideró un nivel de significancia de 0,05, y determinó si existían diferencias significativas entre tratamientos; en caso de ser necesario se aplicó la prueba de comparación de medias según Tukey para identificar los grupos de tratamientos con un comportamiento diferente. En las situaciones en las que se incumplió con los supuestos del ANOVA, se procedió a ejecutar la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis junto a una comparación de medianas, en caso de encontrar diferencias significativas. Todos los análisis se ejecutaron en el software Infostat v. 2020e (Di Rienzo et al., 2020).

8.6 Metodología para actividad adicional dentro del OE3. Evaluación de prototipos de papel elaborados a partir de cinco genotipos comerciales de *Musa textilis* née cultivados en la región tropical

8.6.1 Procedencia y selección de materia prima

La materia prima utilizada en la fabricación de los prototipos de papel corresponde a cinco genotipos de fibra virgen de *M. textilis* (IB16, IA17, IR18, GP31 y SP32), caracterizados por su calidad comercial según el estándar nacional de venta.

Los genotipos IB16, IA17 y IR18 corresponden a fibra cosechada de una plantación piloto perteneciente al Instituto de Transferencia Agropecuaria de Costa Rica (INTA) ubicada en Guápiles, Limón, Costa Rica (10°15'N, 83°46'W). El sitio presenta una temperatura media anual de 22,2 °C y una precipitación media anual de 3362 mm (Climate-Data, 2019a); con suelos del orden Inceptisol (Ortiz & Soto, 2014) y un pH medio de 5,5. Mientras que los genotipos GP31 y SP32 corresponden a plantaciones comerciales ubicadas en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23' N, 83°56' W). Dicha ubicación, se caracteriza por presentar una precipitación media anual de 2996 mm y una temperatura media anual de 22 °C (Climate-Data, 2019b); con suelos identificados dentro del orden Ultisol (Ortiz et al., 2014), con un pH ácido promedio menor a 5,5 y una saturación de acidez del 40%.

De cada genotipo, se colectaron tallos de un total de cinco plantas maduras, para la obtención de la fibra. A dichos tallos, se les aplicó la técnica de desfibración descrita por Gölthenboth & Mühlbauer (2010). Se seleccionó exclusivamente la fibra que entrara en la categoría de primera calidad establecida según el estándar nacional de calidad comercial para la especie.

8.6.2 Proceso de deslignificación

La fibra se sometió a un proceso de secado a una temperatura de 70 °C por un periodo de 72 h, hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 12%. Posteriormente, se dimensionó las hebras a un tamaño medio de 20 ± 2 mm de longitud. El material dimensionado fue pulpado con el método a la soda (NaOH al 18%, p/p) a temperatura una temperatura de 120 ± 5 °C durante 3 h. Una vez finalizada la cocción, se procedió a drenar el licor negro y enjuagar la pulpa residual, cribándola manualmente con un tamiz de malla de 1 mm²; y seguidamente, se incubó el material durante 12 h en agua a temperatura ambiente con el fin de eliminar las fracciones solubles residuales de álcali y neutralizar la solución. Posteriormente, se procedió a aplicar un proceso de refinado parcial, en donde se desintegró el material con una licuadora industrial durante 3 min a velocidad alta; para luego, cribar de nuevo el material. Finalmente, la materia prima refinada se cribó de nuevo y se determinó el rendimiento de la pulpa por peso.

8.6.3 Caracterización química de la pulpa

El análisis de la composición química de las pulpas lignocelulósicas se realizó por triplicado e incluyó la cuantificación del contenido de lignina, holocelulosa, cenizas y extractivos; de acuerdo con lo descrito en las normas estandarizadas TAPPI y ASTM.

De esta manera, el contenido de lignina se determinó mediante la aplicación del método gravimétrico según la norma TAPPI T222 om-02 (2002), posterior a la eliminación de extractivos según lo descrito en la norma TAPPI T204 cm-97 (2007). El contenido de holocelulosa se midió siguiendo el método Wise et al. (1946). Los solubles de NaOH al 1% se determinaron con la norma TAPPI T212 om-18 (2018); así como, los solubles en agua fría y caliente según TAPPI T207 cm-07 (2007). Asimismo, los solubles en etanol-tolueno y diclorometano se evaluaron según ASTM D1107-21 (2021) y ASTM D1108-21 (2021), respectivamente.

8.6.4 Formación de las láminas de papel

La conformación de las láminas de papel se realizó siguiendo los parámetros descritos en la norma TAPPI T205 sp-02 (2006) modificada. Para lo cual, se procedió a aplicar el proceso de moldeado de las láminas utilizando un formador de madera con malla N° 60 y dimensiones de 22 x 28 cm (tamaño carta estándar para papel), correspondiendo a una suspensión del material en una relación 1:30 (p/v). Posteriormente, se aplicó el proceso de prensado del lote de láminas en una prensa hidráulica con capacidad de carga de 8000 kg; aplicando una fuerza de 13 kg cm⁻² durante 1 h a temperatura ambiente; con el fin, de completar la extracción del agua residual y proporcionar uniformidad a las láminas. Finalmente, el secado de las láminas se realizó en una habitación con ambiente controlado a 25 ± 1 °C por un periodo de 24 h. Para este estudio, se empleó un gramaje estándar de 100 g m⁻² para todo el conjunto de muestras a caracterizar.

8.6.5 Caracterización de las láminas de papel

Previo a la ejecución d la caracterización planteada, se acondicionaron las láminas durante 48 h a una temperatura de 23 ± 1 °C y una humedad relativa de $50 \pm 2\%$ en una habitación con condiciones ambientales controladas, según lo descrito en la norma TAPPI T402 sp-08 (2013).

8.6.5.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas básicas de las láminas de papel se analizaron por triplicado. Se determinó el peso básico y gramaje de las láminas según la norma T410 om-08 (2013), el contenido de humedad según TAPPI T412 om-22 (2022) y la densidad aparente mediante el cálculo de la relación peso/volumen (volumen calculado a partir del espesor * área de lámina). Asimismo, se evaluó el color mediante el testeó de las muestras por ambas caras por genotipo, con el sistema de cromatografía estandarizada DigiEye de VeriVide, en formato CIELab, generando tres parámetros para explicar el color que consistieron en: L^* (luminosidad), a^* (tendencia de color de rojo a verde) y b^* (tendencia de color de amarillo a azul). Dichos parámetros se utilizaron para calcular el cambio de color $\Delta(E^*)$ (Ec. 1) utilizando como referencia un papel de *M. textilis* obtenido a nivel industrial (empresa en el extranjero). Este parámetro se definió según la clasificación de Hikita et al. (2001) de los papeles fabricados, bajo la siguiente ecuación:

$$\Delta(E^*) = \sqrt{[\Delta(L^*)]^2 + [\Delta(a^*)]^2 + [\Delta(b^*)]^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde $\Delta(E^*)$ representa la diferencia en color, $\Delta(L^*) = L_{\text{comercial}^*} - L_{\text{genotipo}^*}$, $\Delta(a^*) = a_{\text{comercial}^*} - a_{\text{genotipo}^*}$ y $\Delta(b^*) = b_{\text{comercial}^*} - b_{\text{genotipo}^*}$.

8.6.5.2 Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de las láminas se centró en la prueba de tensión, en donde se evaluaron las propiedades: resistencia a la tensión, longitud de rotura, tensión de rotura e índice de tensión; según lo descrito en la norma TAPPI T494 om-01 (Muchorski, 2006). Se fallaron un total de 14 probetas en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen H10KT (Tinius Olsen TMC, Pasadena, CA, USA). Asimismo, se evaluó la propiedad de resistencia al deformado con la prueba de aplastamiento por anillo (Ring Crush Test) descrita en la norma TAPPI T822 om-02 (2007); la permeabilidad al aire con el método de Gurley según la norma TAPPI T460 om-02 (2006) y la propiedad de resistencia a la compresión con el Stiffnes Test (STDI) según TAPPI T826 om-08 (2013). Para estos análisis, se fallaron un total de tres réplicas.

8.6.5.3 Propiedades energéticas

Se evaluó la estabilidad térmica de las muestras mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA) siguiendo la metodología propuesta por Sebío-Puñal et al. (2012), en un equipo modelo SDT Q600 (TA Instruments, New Castle, DE, EE. UU.). Las muestras se programaron para un barrido en una rampa de calentamiento de 20 a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C mm⁻¹, en una atmosfera inerte de nitrógeno constante de 100 ml min⁻¹. Asimismo, se testeó el poder calórico de las muestras con la prueba ASTM D5865/D5865M-19 (2019) y el contenido de cenizas con TAPPI T211 om-02 (2007). Los análisis descritos se evaluaron por triplicado.

8.6.6 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio con análisis de varianza. Previo a ello, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y homocedasticidad de las varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. Posteriormente, se realizó un el ANOVA para cada parámetro analizado con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las pulpas fabricadas; y en caso de ser necesario se aplicó la prueba de Tukey para identificar diferencias entre medias. Los análisis derivados del ANOVA se ejecutaron en el software Infostat v. 2020e (Di Rienzo et al., 2020). Finalmente, se aplicó un

análisis multivariante con el paquete FactoMineR v. 2.4., utilizando el programa R v. 4.2.1. (Makosso-Kallyth & Diday, 2022). Todos los análisis se realizaron con una significancia de 0,05.

8.7 Metodología para actividades del OE4. Transferir los conocimientos generados a productores y extensionistas de abacá a nivel nacional

El proyecto planteó varios mecanismos de divulgación de información, entre los que se detallan los siguientes:

Elaboración de un manual del cultivo del abacá

Este es un manual para el productor por lo tanto no debe ser complejo. Documento en lenguaje sencillo con énfasis en sistemas agroforestales que pueda ser aplicado a las condiciones del trópico americano.

Publicación de artículos

El proyecto se comprometió a publicar al menos 4 artículos científicos en revistas indexadas.

Talleres anuales sobre el cultivo

El proyecto inició a generar información a partir del primer año y paralelamente se continuó con el incentivo de incorporación de componente arbóreo al cultivo del abacá, lo cual generó la necesidad de ofrecer al menos un taller anual para los productores. Se consideró que esta actividad es interinstitucional con participación del TEC, MAG-INTA-INDER, empresas. El financiamiento de esta actividad se hará con recursos compartidos entre los actores del proyecto.

Seminario nacional sobre uso de fibras naturales

Este seminario será organizado por el TEC con el apoyo de otros socios y con participación de expositores internacionales.

Participación en congresos

Los investigadores del proyecto seleccionarán los eventos nacionales o internacionales donde se presentarán los resultados con ponencia o poster. Al menos se prevé participar en dos eventos.

Plan de difusión y transferencia de resultados

Sobre la marcha del proyecto se tiene planificado la difusión de resultados a la comunidad científica, productores, organizaciones y empresarios del país de la siguiente manera:

1. Se tendrá disponible un sitio en facebook o sitio web con los alcances del proyecto. De ser posible y preferible se incorporarán los contenidos generados en la página del TEC. De no ser así en WordPress/Google sites u otra ubicación.
2. Se utilizarán los medios disponibles en el TEC para divulgar los avances del proyecto y se confeccionará un manual o libro sobre el cultivo del abacá.
3. Anunciar el proyecto en los medios, preferiblemente buscar pautas publicitarias en programas de radio y televisión, así como prensa escrita.

4. Promocionarlo a nivel del Programa Interinstitucional PITTA-musáceas, a través del Ministerio de Agricultura, Ministerio de Ambiente y Energía.
5. Presentar el proyecto en congresos y seminarios del campo forestal y agronómico a nivel nacional e internacional.
6. Las publicaciones científicas en revistas indexadas serán el elemento clave de la divulgación. También se considera la publicación a nivel nacional en revistas con Comité Editorial.

9 Resultados

9.1 Resultados del OE1. Evaluar el comportamiento fisiológico y el rendimiento del componente arbóreo en asocio con el cultivo de abacá bajo diferentes condiciones de sombra y régimen de manejo.

9.1.1 Plantaciones establecidas por el proyecto y sitios de ensayos

En la Tabla 4 se detallan las fincas y personas productoras que facilitaron sus fincas y su trabajo para el establecimiento de experimentos de campo, permitir los muestreos y establecer los sitios demostrativos para las jornadas de capacitación y réplicas de los modelos agroforestales. En un total de 15 fincas y 39 has se concentró todo el trabajo de campo y constituyen una contrapartida en insumos y mano de obra de alrededor de ₡ 39.000.000 de colones durante los 3 años de proyecto. Sin la ayuda de estas organizaciones y personas productoras no hubiese sido posible obtener los resultados de este proyecto.



Figura 2. Trabajo y terrenos ofrecidos por los productores para realizar experimentos

Tabla 4. Detalle de las fincas destinadas para fines del proyecto

Tipo de ensayo	Localidad	Propietario	Objetivo	Coordenadas	Especies	Fecha establecimiento	Área (has)
Experimentos	La Chavez, Sarapiquí	Kevin Arias	Agroforestal, sombra, fisiología	10°22'58.0"N 83°56'36.2"W	Abacá, pilón, almendro, laurel, melina	feb-20	1
Experimentos	La Chavez, Sarapiquí	Rogelio Solano Jimenez	Agroforestal y sombra saran	10°23'06.3"N 83°56'39.4"W	Abacá, balsa, melina	abr-21	4
Experimentos	La Chavez, Sarapiquí	Luis Arguedas Hidalgo	Fertilización y enfermedades	10°22'58.0"N 83°56'36.2"W	Abacá	jun-21	1
Experimentos	Finca Agua, Sarapiquí	Emilio Balletero	Espaciamientos, semillero	10°23'31.9"N 83°54'37.0"W	Abacá	jun-21	8
Experimentos	La Argentina, Pocora	Gonzalo Cruz	Agroforestal en bosque	10°09'44.5"N 83°36'28.5"W	Abacá y bosque de cebo	set-22	1
Experimentos	Los Chiles	Ethical Forestry	Agroforestal con melina	10°49'08.9"N 84°31'26.3"W	Abacá y melina	jun-21	1
Experimentos	La Chavez, Sarapiquí	Carlos Luis Rojas	Encalado y enfermedades	10°22'58.3"N 83°56'39.0"W	Abacá	jun-20	1
Experimentos	La Lola, Matina	CATIE	Agroforestal	10°05'29.4"N 83°23'32.5"W	Cedro, laurel, hule	jun-21	5
Experimentos	Islona, Siquirres	Eddy Molina Diaz	Agroforestal y sombra	10°13'15.9"N 83°28'35.2"W	Abacá, cedro, caoba, melina, gallinazo	ene-20	4
Piloto demostrativo	Guápiles, Los Diamantes	INTA	Agroforestal mixto	10°15'41.0"N 83°46'20.6"W	Abacá, cacao, árboles, yuca, papaya, camote, coberturas	ene-20	1
Piloto demostrativo	Guácimo, Anita Grande	Mario Villafuerte	Agroforestal	10°15'43.3"N 83°43'56.5"W	Abacá y Laurel	ene-20	1
Piloto demostrativo	Dos Bocas, Siquirres	Mario Garrón	Agroforestal	10°13'15.9"N 83°28'35.2"W	Abacá, cashá	ene-20	5
Piloto demostrativo	Dos Bocas, Siquirres	Eddy Molina Diaz	Agroforestal	10°13'15.9"N 83°28'35.2"W	Abacá y hule	dic-22	2
Piloto demostrativo	Venecia, San Carlos	Esteban Cambronero	Agroforestal	10°22'05.8"N 84°16'13.8"W	Abacá y caoba	ene-22	1
Piloto demostrativo	Río Jiménez	Sergio Arias	Agroforestal	10°14'24.7"N 83°34'48.8"W	Abacá, balsa, melina	ene-22	3
TOTAL 15 fincas							39

9.1.1.1 Primer ensayo policultivo y sitio piloto en la Estación Experimental Los Diamantes

En el mes de enero del 2020, sin conocer la magnitud de lo significaría una pandemia mundial, un grupo de investigadores del Tecnológico de Costa Rica y especialistas de la Estación Experimental el INTA en Los Diamantes, se propuso diseñar un sistema único que pudiera combinar las mejores experiencias de cada experto para establecer un modelo tecnológico de sistemas agroforestales basados en abacá (*Musa textiles*), diferentes especies de árboles maderables y las combinaciones espaciales y temporales que incluyeran cultivos agrícolas como yuca, papaya, cacao, camote, frijol y coberturas del suelo.

El objetivo fue establecer diversas combinaciones para generar experiencias, hacer intercambio de saberes entre profesionales de diferentes disciplinas y demostrarles a las personas productoras nuevas alternativas de cultivos.

Por año y medio y con las restricciones de la pandemia, se brindó mantenimiento, monitoreo y la colecta de datos que fueron expuestos en un seminario interno entre personal del TEC y personal del INTA.

Este documento resume las experiencias generadas en los sistemas agroforestales con abacá y además fueron sistematizadas en un trabajo final de graduación de una estudiante de la carrera de ingeniería forestal, ahora Ing. Adriana Fallas Cosio.

El informe de las actividades desarrolladas, así como el intercambio de las experiencias están sistematizadas en el siguiente documento:
https://drive.google.com/file/d/1d2APwUkFP_OiK0npSJMY4dJV_WspBeWS/view?usp=drive_link

Manejo tecnológico de un modelo agroforestal en la Estación Experimental Los Diamantes

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Informe

Trabajo conjunto de sistema demostrativo para personas productoras

INTA-TEC

2020



Figura 3. Personal técnico del INTA al inicio de los experimentos de abacá y policultivos a inicios del 2020



Figura 4. Vista aérea de los ensayos de policultivos con abacá. Al fondo se aprecia el jardín de las variedades de abacá que por muchos años ha conservado el INTA.

9.1.1.2 Caracterización de crecimiento y fisiología de un sistema agroforestal con *Gmelina arborea* (Roxb), *Swietenia macrophylla* (King), *Dipteryx panamensis* (Pittier) con *Musa textilis* (Née) en Guápiles, Limón, Costa Rica

De los primeros ensayos establecidos en el proyecto se generó un trabajo final de graduación que fue presentado por la estudiante Adriana Fallas Cosío y resume los resultados de la caracterización del crecimiento inicial y variables fisiológicas del sistema agroforestal con *Gmelina arborea* (Roxb), *Swietenia macrophylla* (King), *Dipteryx panamensis* (Pittier) y *Musa textilis* (Née).

Resumen

Los sistemas agroforestales son métodos de producción sostenible que combinan en un mismo sitio diferentes especies agrícolas y forestales. Al tener diferentes interacciones entre plantas es importante conocer el desarrollo y producción de los individuos. Entre las herramientas utilizadas para el manejo de los sistemas, resaltan la generación de modelos matemáticos de crecimiento y rendimiento de las especies a partir de mediciones dasométricas. También sobresale el uso de instrumentos que generan información en menor tiempo con la finalidad de tener el estado nutricional de los cultivos de forma rápida, así como

evaluar la necesidad de aplicar enmiendas y fertilizantes que ayuden al crecimiento de las especies. Uno de ellos es el medidor de los niveles de clorofila, conocido como SPAD, equipo que, mediante la diferencia de transmisión de dos haces de luz, estimada el contenido de nitrógeno foliar. Otro instrumento es el colorímetro, el cual determina el color matemático de la muestra mediante el sistema de color CIELAB, y permite verificar si el contenido de clorofila está correlacionado con la intensidad del color verde. Esta investigación evaluó el uso de los instrumentos SPAD y el colorímetro para la determinación de nitrógeno foliar utilizando métodos no destructivos de medición. Además, analizó la correlación entre el crecimiento de una especie forestal y un cultivo agrícola, así como la influencia de variables climáticas.

La investigación también tuvo el respaldo de una beca CENAT del CONARE y se le brindó amplia divulgación, como puede verse en el siguiente enlace: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2020/06/11/estudiante-investigara-aplicaciones-tecnologicas-sistemas-agroforestales-beca-cenat>

El informe completo del trabajo de graduación se puede revisar en el siguiente enlace: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/13178>

9.1.1.3 Comparación de tres métodos para la estimación de la cobertura del dosel en sistemas agroforestales de *Musa textilis* (neé) asociado a especies maderables en Costa Rica

La evaluación de la sombra en los sistemas agroforestales es uno de los aspectos clave para el manejo de estos sistemas y debe ser del entendimiento especialmente para que las personas productoras. Utilizando la red de ensayos y plantaciones de abacá con árboles se ejecutó otro trabajo de graduación para comparar tres métodos para la estimación de la cobertura del dosel en sistemas agroforestales de *Musa textilis* (neé) asociado a especies maderables en Costa Rica.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DEL DOSEL EN
SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Musa textilis* (Neé)
ASOCIADO A ESPECIES MADERABLES EN COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA

CYNTHIA GIMENA MONGE GUZMÁN

CARTAGO, COSTA RICA, 2022

Resumen

Musa textilis, mejor conocida como abacá, es una especie perteneciente a la familia Musáceae, la cual es cultivada en Costa Rica con el fin de producir fibra comercial para su exportación. La presente investigación tuvo como objetivo comparar tres métodos para la estimación de cobertura del dosel en sistemas agroforestales de abacá asociado a especies maderables en la Región Huetar Norte y Atlántica de Costa Rica. Esto con la finalidad de brindarle a la persona productora la mejor opción para la estimación de cobertura del dosel en su cultivo, tomando en cuenta factores estadísticos, costos, precisión y accesibilidad para el productor. Los métodos de evaluación utilizados fueron un densiómetro esférico cóncavo, un densiómetro cúbico de fabricación casera y la aplicación móvil HabitApp. Se utilizó estadística no paramétrica para el análisis y comparación de los métodos empleados, obteniendo como resultado que hay diferencias significativas en la estimación de la cobertura del dosel según el instrumento utilizado, ya que dependen de la distribución tanto horizontal como vertical de las especies para cobertura en el sistema agroforestal.

El informe completo del trabajo de graduación se puede revisar en el siguiente enlace:
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14297>



Figura 5. Campaña de mediciones de los niveles de luz con diferentes instrumentos, en este caso utilizando un densiómetro de copas.

9.1.1.4 Experimento sobre el efecto de diferentes especies de árboles: fisiología y sombra

Los resultados de los experimentos de sombra con árboles y de los aspectos fisiológicos corresponden al trabajo de tesis de maestría de la Ing. Mónica Araya Salas. Varios de los resultados de la tesis fueron publicados en artículos científicos.

La tesis completa está titulada: Evaluación de un arreglo agroforestal de *Musa textilis* née con árboles maderables nativos y caracterización de su fibra para papel y materiales compuestos se puede consultar

en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1SZyuslYfzhaxVzgxvli4y4Hf_cq9v6j/view?usp=drive_link

9.1.1.4.1 Sombra y fisiología

Un artículo fue publicado en la revista Tecnología en Marcha con los resultados de crecimiento y comportamiento del abacá bajo sombra, cuya cita es la siguiente:

Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Muñoz-Acosta, F; Camacho-Calvo, A.M; Garro-Monge, G; Jiménez-Quesada, K; Mora-Molina, J. Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales. Tecnología en Marcha. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 50-59. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6235>



Figura 6. Mediciones de parámetros fisiológicos en sistemas de abacá con árboles

El enlace a la publicación es el siguiente:

https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6235

Inicio > Archivos
 > 2022: Vol. 35 especial. V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado
 > Artículo científico

Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales



PDF

Publicado: jun 7, 2022

DOI:
<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6235>

Palabras clave:
 Muse textiles agroforesterías fibra natural árboles tropicales

Mónica Araya-Salas
 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-3075-6103>

Dagoberto Arias-Aguilar
 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

Juan Carlos Valverde-Otárola
 3 Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción
<https://orcid.org/0000-0002-3181-1348>

Kevin Arias-Ceciliano
 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0001-9911-4515>

Freddy Muñoz-Acosta
 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0001-6823-7379>

Ana Marlen Camacho-Calvo
<https://orcid.org/0000-0002-1625-9039>

Giovanni Garro-Monge
 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0001-7578-1938>

Karol Jiménez-Quesada
 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-0162-9279>

Jesús Mora-Molina
 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-2309-1940>

9.1.1.4.2 Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis*

Otro artículo fue publicado en la revista Tecnología en Marcha con los resultados de crecimiento y desarrollo del abacá bajo la sombra de las especies Pílon, Laurel y Almendro, cuya cita es la siguiente:

Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Mora-Molina, J. Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 40-49.
<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6234>

El enlace a la publicación es la siguiente:

https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6234

Inicio > Archivos

> 2022: Vol. 35 especial. V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado

> Artículo científico

Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica



PDF

Publicado: jun 7, 2022

DOI:

<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6234>

Palabras clave:

Agroforestería *Musa textilis*
SPAD *Cordia alliodora*
Hieronyma alchorneoides
Dipterix panamensis

Mónica Araya-Salas

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-3075-6103>

Dagoberto Arias-Aguilar

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

Juan Carlos Valverde-Otárola

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción
<https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>

Kevin Arias-Ceciliano

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0001-9911-4515>

Jesús Mora-Molina

5 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica
<https://orcid.org/0000-0002-2309-1940>

Resumen

Musa textilis conocida en Costa Rica y otros países como abacá, es una especie de la familia Musaceae que ha sido cultivada comercialmente por su capacidad para producir fibra de calidad industrial. Un factor clave para la economía rural de Costa Rica es aumentar la productividad y calidad de la fibra, optimizando los costos de manejo y cosecha. El presente trabajo busca generar resultados válidos del efecto positivo de la interacción de árboles maderables en un arreglo agroforestal con el abacá, con especial interés en el efecto posterior que generará la sombra en el crecimiento de todas las especies y en la calidad de la fibra. En la literatura existen pocos estudios que analicen el valor de la interacción del cultivo de abacá con árboles en términos de su crecimiento y desarrollo fisiológico. Por tanto, en este estudio se presentan los resultados preliminares del efecto del sombreado de tres especies maderables nativas sobre el crecimiento del abacá. Para este propósito, se hicieron mediciones mensuales de crecimiento (diámetro y altura total) y de desarrollo fisiológico con mediciones SPAD. La hipótesis es que existe efecto positivo significativo (incremento) en el crecimiento y desarrollo del cultivo en asocio con especies maderables, mostrando diferencias significativas a largo plazo entre tratamientos. En general, se encontró que sí existen diferencias significativas entre el crecimiento en altura para las plantas establecidas en asocio con especies maderables y las plantas testigo.



Figura 7. Uso del medidor CIRAS 3 para las mediciones de fotosíntesis en un árbol de laurel y luego en una planta de abacá en un sistema con *Dipteryx panamensis*.

9.1.1.4.3 Desarrollo fisiológico y mediciones de fotosíntesis de un arreglo agroforestal de *Musa textilis* née con árboles maderables nativos de la región tropical

En la vigencia del proyecto se continuaron recolectando datos para una nueva publicación, en este apartado se presentan los resultados en formato de artículo científico.

Resumen

Musa textilis es una musácea cultivada comercialmente por su capacidad para producir fibra lignocelulósica de calidad industrial. El presente estudio realizó un análisis exploratorio sobre el efecto de la interacción dasométrica y fisiológica generada al introducir plantas de *M. textilis* en un arreglo agroforestal con las especies maderables nativas *C. alliodora*, *H. alchorneoides* y *D. panamensis* previo al primer periodo de cosecha de las plantas. La problemática tiene que ver con el uso óptimo del suelo, la sostenibilidad del cultivo y la necesidad de diversificar los sistemas productivos a nivel de finca en Costa Rica; por lo cual, se busca entonces contribuir con información sobre el desempeño de la especie al desarrollarse en SAF's con árboles. Para ello, se hicieron mediciones mensuales del crecimiento vertical y del desarrollo fisiológico de todos los individuos con mediciones de clorofila en valores SPAD. Asimismo, se aplicó una medición en el mes 18 de edad de las plantas con un equipo CIRAS III de las variables: asimilación fotosintética (A_n), transpiración (E), conductancia estomática (g_s), $iWUE$ y VPD . Los resultados mostraron que las plantas de *M. textilis* presentan un crecimiento superior al ser introducidas en sistemas diversificados, en donde en específico el tratamiento con *C. alliodora* presentó los mayores

crecimientos en altura (3,01 m) para el último mes de medición. Respecto a los valores SPAD, el tratamiento testigo presentó los mayores valores; y en todos los casos el comportamiento del nitrógeno relacionado con la clorofila fue similar al inicio con un incremento posterior al mes más seco y una disminución de los niveles al entrar los meses más lluviosos (marzo-agosto). Respecto a las demás variables, los tratamientos con árboles presentaron una eficiencia fotosintética similar a las plantas a pleno sol. Estos resultados son importantes para la toma de decisiones futuras acerca del establecimiento y de manejo de sistemas productivos de *M. textilis*.

El documento en extenso en forma de artículo científico puede ser consultado en el siguiente enlace: https://drive.google.com/file/d/1nyvtXshaPLTa2K1OaHMr94XhzcS5KP_x/view?usp=drive_link

9.1.1.4.4 Resumen de los resultados del proyecto de investigación

Un artículo de divulgación fue publicado en la revista de la VIE InvestigaTEC con el título “Experiencias del TEC en la generación de conocimiento sobre el cultivo de abacá en acompañamiento a las personas productoras de la Zona Norte y Atlántica de Costa Rica”.

El enlace para esta publicación es el siguiente:

https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/6633

Resumen

Costa Rica ha realizado diversos esfuerzos para reducir la deforestación, manejar y conservar los bosques, reforestar y establecer sistemas agroforestales (SAF). Ello lo ha posicionado como uno de los países latinoamericanos que ha recuperado su cobertura forestal de manera satisfactoria. Estos esfuerzos además han promovido el desarrollo sostenible y equitativo en las zonas rurales, a fin de contribuir con la política de Cambio Climático y Carbono Neutralidad. De esta manera, pequeños y medianos productores han jugado un papel importante en este logro nacional, pues las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales son actividades que producen madera, son rentables, diversifican la producción en las fincas y prestan servicios ambientales que colaboran en la reducción de los efectos del cambio climático. En esta publicación se resumen los esfuerzos del TEC en la búsqueda de nuevos modelos productivos basados en sistemas agroforestales.

Experiencias del TEC en la generación de conocimiento sobre el cultivo de abacá en acompañamiento a las personas productoras de la Zona Norte y Atlántica de Costa Rica

Investiga.TEC



PDF

Publicado: feb 7, 2023

Palabras clave:Fibras Abacá Agroforestería
Museo textil

Dagoberto Arias-Aguilar

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

Resumen

Costa Rica ha realizado diversos esfuerzos para reducir la deforestación, manejar y conservar los bosques, reforestar y establecer sistemas agroforestales (SAF). Ello lo ha posicionado como uno de los países latinoamericanos que ha recuperado su cobertura forestal de manera satisfactoria. Estos esfuerzos además han promovido el desarrollo sostenible y equitativo en las zonas rurales, a fin de contribuir con la política de Cambio Climático y Carbono Neutralidad. De esta manera, pequeños y medianos productores han jugado un papel importante en este logro nacional, pues las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales son actividades que producen maderas, son rentables, diversifican la producción en las fincas y prestan servicios ambientales que colaboran en la reducción de los efectos del cambio climático. En esta publicación se resumen los esfuerzos del TEC en la búsqueda de nuevos modelos productivos basados en sistemas agroforestales.

Número

[Vol. 16 Núm. 46 \(2023\)](#)

9.1.1.4.5 Artículo tipo “review” publicado en revista indexada

Un artículo fue publicado con la revisión más extensa sobre las experiencias del cultivo de abacá con énfasis en Latinoamérica. La publicación se titula “Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world”, en español “Abacá: una revisión general sobre sus características, productividad y mercado en el mundo”.

La cita del artículo es la siguiente:

Araya Gutierrez, D., Garro Monge, G., Jimenez Quesada, K., Arias Aguilar, D. and Quesada Cordero, R. (2023). Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76(1), 10263–10273. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n1.101710>

La cita de esta publicación es la siguiente:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/101710>

Resumen

El abacá también conocido como cáñamo de manila, produce una fibra natural que es conocida como la más resistente del mundo, tiene propiedades como resistencia a la salinidad, resistencia mecánica, flexibilidad y durabilidad. Las características únicas de la fibra han provocado un aumento de su uso en muchas industrias, sin embargo, el cultivo de abacá se ve amenazado por la presencia de la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, una de las enfermedades más importantes y que ha sido considerada la más letal debido a la escasez de métodos de control existentes. El objetivo del artículo es resaltar datos recientes sobre las características de la planta y su fibra, manejo del cultivo, productividad y mercado como un enfoque para actualizar los conocimientos actuales sobre el abacá. Se encontró que algunas características de la fibra de abacá, como resistencia y propiedades físicas, dependen de la posición de sus hojas, de la madurez de la planta y también del sistema de extracción de la fibra. Respecto a la extracción de fibras se menciona que existen dos tipos de métodos (pelado y decorticación). En relación con la productividad, existe una diferencia considerable entre las formas de extracción de haces, por ejemplo, la técnica de pelado manual produce alrededor de 20 kg de haces de fibras por día. Se concluye que el abacá presenta un gran potencial como cultivo que podría potenciar los mercados de diversos países, sin embargo, la información disponible en torno a este cultivo es escasa, por lo que es necesario aumentar la investigación en referencia a su producción y manejo para promover un mayor aprovechamiento.

Review article

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame>

Revista
Facultad Nacional
de Agronomía

Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Abacá: una revisión general sobre sus características, productividad y mercado en el mundo

<https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n1.101710>

David Araya-Gutiérrez¹, Giovanni Garro Monge^{1*}, Karol Jiménez-Quesada¹, Dagoberto Arias-Aguilar¹ and Randall Quesada Cordero¹

ABSTRACT

Keywords:
Crop management
Extraction
Fiber
Polymeric matrix
Varieties

The abaca also known as cáñamo of manila, produces a natural fiber that is known as the most resistant worldwide natural fiber, that has properties like resistance to salinity, mechanical strength, flexibility, and durability. The unique characteristics of fiber have caused an increase in its use in many industries. However, the cultivation of abaca is threatened by the presence of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, one of the most important diseases which has been considered the most lethal, due to the scarcity of existing control methods. The article aims to highlight recent data about the characteristics of the plant and its fiber, crop management, productivity, and the market as an approach updating the current knowledge regarding the abaca. It was found that some characteristics of abaca fiber such as strength and physical properties depend on the position of its leaves, on the maturity of the plant, and also on the fiber extraction system. Regarding fiber extraction, it is mentioned that there are two types of methods (stripping and decortication). Concerning productivity, there exists a considerable difference between the ways of bundle extraction, for instance, the hand stripping technique produces about 20 kg of fiber bundles per day. It is concluded that abaca has great potential as a crop that could boost the markets of various countries. Though the information available on this crop is scarce, it is necessary to increase research about its production and management to promote greater use.

9.1.2 Fichas técnicas de 5 especies forestales para sistemas agroforestales con abacá

Las experiencias del proyecto con el uso de especies forestales permitieron obtener un ciclo completo de cosecha de fibra de abacá y ver el comportamiento del cultivo en función de la arquitectura de la copa de

los árboles y su incidencia con respecto a la sombra. Los resultados han sido sistematizados en 6 fichas técnicas preparadas especialmente para el productor (ver Tabla 5). Estas fichas técnicas están en formato digital y cada vez que se imparte una capacitación se valora su impresión. Ya han sido validadas con los productores que tienen estos sistemas en sus fincas.

Tabla 5. Enlaces para acceder a las fichas técnicas por especies forestal para uso en sistemas agroforestales con abacá.

Título de la ficha	Especie	Enlace	Número de páginas
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Almendro	<i>Dipteryx panamensis</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/1nBvDqZ5c19x-PjIU4wbNREfwJhrfuHs4/view?usp=drive_link	23
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Pilón	<i>Hieronyma alchorneoides</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/1clrRr43C6NuyHnn1tP5cQvUoutOspiAy/view?usp=drive_link	25
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Laurel	<i>Cordia alliodora</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/1krylV4tZnCPRqVfIqvT00X7FZ5HaPx5D/view?usp=drive_link	25
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Melina	<i>Gmelina arborea</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/1t4qfVX5svWP9L6jOwYTONJIQXNNwIk17/view?usp=drive_link	33
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Balsa	<i>Ochroma lagopus</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/1vGxdKNpgb8Yxi4MIF1j0fqHFd4qRCdwC/view?usp=drive_link	33
Guía técnica para el establecimiento de sistemas agroforestales con abacá y Meliáceas	<i>Cedrela odorata</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> y <i>Musa textilis</i>	https://drive.google.com/file/d/16E8KAX7oWmBdXU7A7OBUvaL8aEdjA66/view?usp=drive_link	29



Figura 8. Detalle de las guías técnicas elaboradas para la persona productora, en total se prepararon 6 guías sobre especies maderables para sistemas agroforestales con abacá.

9.2 Resultados del OE2. Obtener el protocolo óptimo para la propagación sexual y asexual del abacá para el suministro de semilla de calidad para los productores.

9.2.1 Caracterización molecular de cultivares de abacá disponibles en el país

Diversos documentos hacen referencia a diferentes cultivares existentes en el país, tales como “Maguindinao”, “Tongongon”, “Bungalnon” y una variedad “Bribri” en la provincia de Limón. En la historia más reciente se hace referencia a una iniciativa de una empresa denominada Abatex que en el año 2009 impulsó el cultivo de abacá en la región del Caribe, para lo cual trabajó de manera coordinada con el CATIE y el INTA. Hay reportes de avances en cultivo *in vitro* y una cantidad de fincas utilizaron clones sin tener conocimiento de cuáles materiales genéticos están presentes en una u otra finca. Una colección de materiales se mantiene todavía en la Estación Experimental Los Diamantes del INTA, otra se encuentra en finca La Lola en Matina, propiedad del CATIE y hay otros cultivares en sitios de DOLE. No existe un estudio que oriente sobre la diversidad genética de estos cultivares y no se tiene certeza de cuáles materiales se están utilizando en el país. En términos generales se reconocen a nivel internacional las siguientes características (Tabla 6).

Tabla 6. Características generales de tres variedades de abacá de importancia económica

Variedad	Características	Producción de fibra
Tangongon	Entre 4 y 5 m de altura	2,5% y 3,0% de fibra que puede resultar difícil de extraer
Bongulanon	Maduración temprana, su rendimiento disminuye a los 5 años	2,3% de fibra fuerte, blanca, de buena calidad y fácil extracción
Maguindanao	Vida productiva de más de 15 años	1,75% de fibra fuerte, blanca y blanda, que se extrae fácilmente

Fuente: Wong et al., 2002.

Por lo anterior el proyecto de investigación del TEC planteó la necesidad de realizar estudios sobre aspectos moleculares de estos materiales genéticos y este estudio es pionero.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los estudios de caracterización molecular del abacá en Costa Rica

9.2.1.1 Extracción de ADN de variedades de abacá.

En la Tabla 7, se muestran los resultados obtenidos de concentración de ADN y calidad para cada uno de los materiales utilizados.

Tabla 7. Cantidad y calidad de ADN obtenido para los cultivares estudiados

Material	Concentración ng/uL	A260/A280
TONGONGON	145,9	1,76
MANGUINDANAO	130,7	1,88
BUNGALONON	179,0	1,86
BRIBRI	126,5	1,79

Los resultados obtenidos en la cuantificación de ADN revelan diferencias significativas en las concentraciones entre las muestras analizadas. El material BUNGALONON exhibió la concentración más alta de ADN (179.0 ng/ μ l), mientras que el material BRIBRI presentó la concentración más baja (126.5 ng/ μ l). Obtener concentraciones mayores a 50 ng/ μ l es un rendimiento aceptable y facilita cualquier ensayo posterior en el que se vaya a emplear este ADN (Van Wieren-De Wijer et al., 2009).

En cuanto a la pureza, se evaluó mediante la relación 260/280, donde un valor cercano a 1.8 generalmente indica ADN puro (Aleksić et al., 2012). Los valores obtenidos en este estudio varían ligeramente, con el material MANGUINDANAO mostrando la relación más alta (1.88) y el material TONGONGON la más baja (1.76).

Las diferencias en concentración y pureza entre las muestras pueden deberse a diversos factores, como la calidad y la integridad del ADN extraído, así como a la presencia de contaminantes. Es importante considerar estas variaciones al interpretar los resultados y planificar investigaciones posteriores. Además, es recomendable repetir las mediciones o aplicar técnicas adicionales, como la electroforesis, para obtener una comprensión más completa de la calidad y la cantidad del ADN en estas muestras de abacá (Pachchingae *et al.*, 2016).

9.2.1.2 Optimización de la Temperatura de anillamiento (T_m) de cada marcador

Tal como se observa en las Figuras 9 y 10, se llevó a cabo una serie de reacciones de PCR, una para cada marcador, en las cuales se exploraron diversas temperaturas con el objetivo de identificar las condiciones óptimas de amplificación para cada marcador. En todas las reacciones se probó al menos una muestra de ADN de cada material de abacá obtenido.

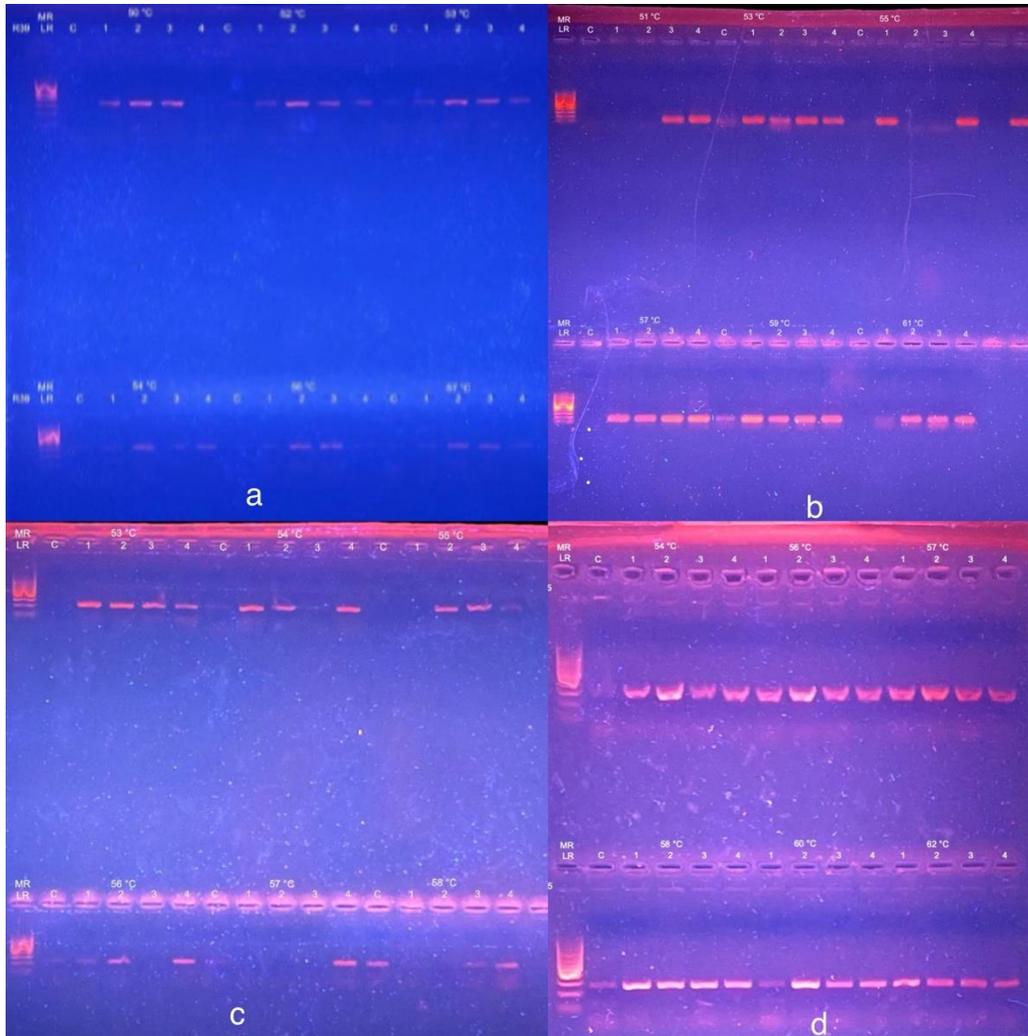


Figura 9. Gradiente de temperatura de anillamiento para los marcadores a) R40, b) R07, c) R231 y d) R45.

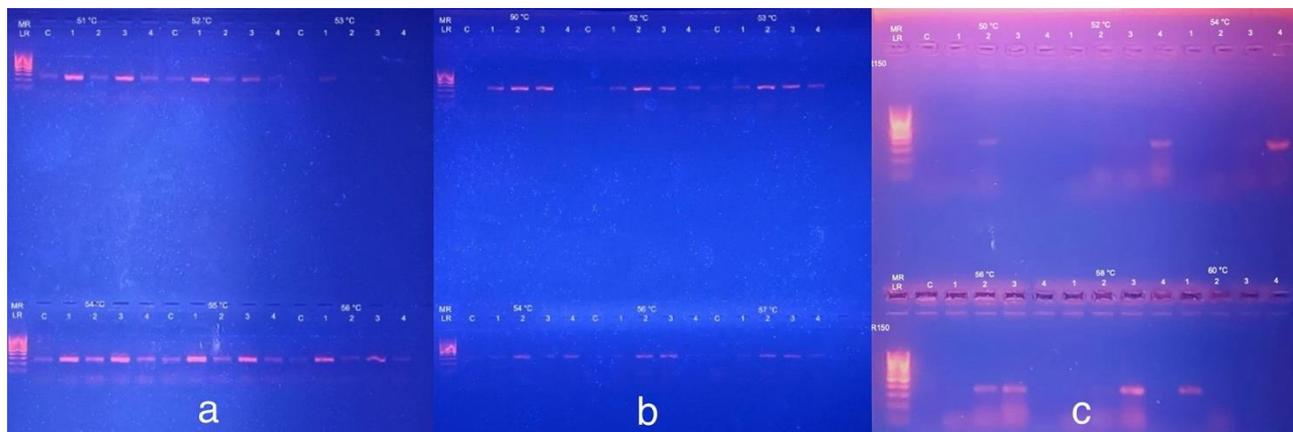


Figura 10. Gradiente de temperatura de anillamiento para los marcadores a) R264, b) R39 y c) R150.

En la Tabla 8 se muestra una comparación entre las temperaturas recomendadas por el fabricante de los cebadores (primers) y las temperaturas observadas durante las repeticiones del PCR de gradiente. Esta comparación es fundamental para determinar las condiciones óptimas de amplificación de cada marcador específico. El comparar las temperaturas de anillamiento es esencial, ya que pequeñas variaciones pueden influir significativamente en la eficiencia de la amplificación y en la especificidad del PCR (Ishii & Fukui, 2001).

Los resultados de las temperaturas de anillamiento (T_m) presentados en la Tabla 8 revelan que, en la mayoría de los casos, las temperaturas ideales obtenidas durante las repeticiones del PCR de gradiente se acercan o son similares a las temperaturas recomendadas por el fabricante. Esto sugiere que las condiciones de anillamiento proporcionadas por el fabricante son adecuadas para la amplificación de los marcadores SSR evaluados en el proyecto de identificación de variedades de abacá. Sin embargo, también se identifican algunas discrepancias, como en el caso del marcador R39, donde la temperatura ideal es ligeramente inferior a la temperatura recomendada por el fabricante. Estas discrepancias podrían deberse a factores específicos de las muestras de abacá o a variaciones en las condiciones de laboratorio (Porta & Enners, 2012). Por lo tanto, es importante considerar estas diferencias y realizar ajustes necesarios en futuros experimentos para optimizar la amplificación de este marcador en particular.

En resumen, la comparación de las temperaturas de anillamiento obtenidas en este estudio proporciona información valiosa para garantizar condiciones adecuadas de PCR en el proyecto de identificación de variedades de abacá. La mayoría de los marcadores SSR evaluados parecen funcionar bien a las temperaturas recomendadas por el fabricante, aunque se deben tener en cuenta las variaciones individuales y realizar ajustes específicos cuando sea necesario para lograr resultados consistentes y fiables en el análisis de las muestras de abacá. Esta evaluación meticulosa y la adaptación de las condiciones de amplificación contribuirán al éxito global del proyecto.

Tabla 8. Temperatura de anillamiento recomendado por el fabricante y la temperatura ideal según el PCR de Gradiente.

Marcador SSR	T_m Fabricante	T_m ideal
R45	60	62
R231	55	56
R150	55	58
R264	54	56
R39	57	53
R40	60	58
R07	62	57

9.2.1.3 Electroforesis capilar acoplada a fluorescencia

En la Figura 11 se presentan los resultados de la electroforesis capilar acoplada a fluorescencia.

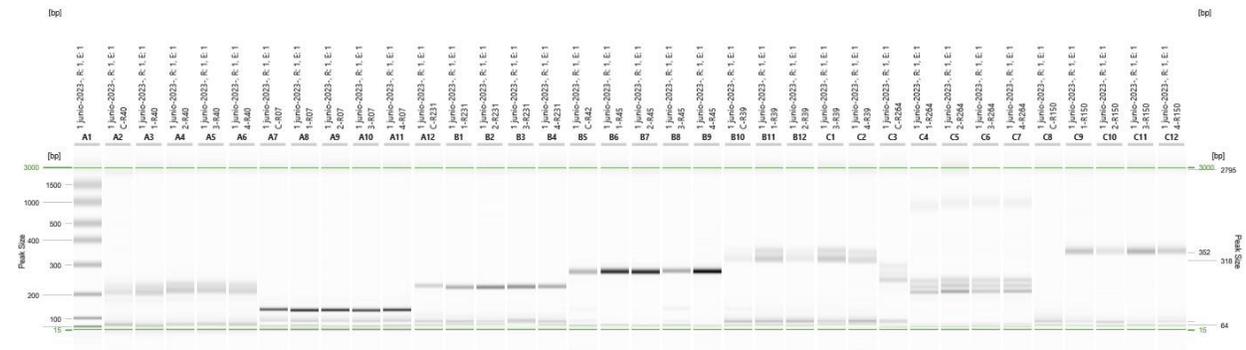


Figura 11. Resultados de la electroforesis capilar acoplada a fluorescencia.

A1 es el marcador molecular, A2-A6 las muestras con el marcador R40, A7-A11 las muestras con el marcador R07, A12-B4 las muestras con el marcador R231, B5-B9 las muestras con el marcador R45, B10-C2 las muestras con el marcador R39, C3-C7 las muestras con el marcador R264 y C8-C12 las muestras con el marcador R150.

En el análisis del marcador R40, se observó una variación significativa en las longitudes de los fragmentos obtenidos en las muestras de abacá en comparación con las expectativas (540 pb). Para el material TONGONGON, se obtuvo un fragmento de 207 pb, lo que representa una diferencia considerable respecto al tamaño esperado de 540 pb. En el caso del material MANGUINDANAO, se detectaron dos fragmentos de 214 pb y 231 pb, indicando una variabilidad en la longitud de los productos de PCR. Para el material BUNGALONON, se obtuvo un fragmento de 215 pb, y el material BRIBRI mostró tres amplificaciones distintas, con tamaños de 178 pb, 212 pb y 228 pb. Estas diferencias sugieren una variación genética en la región analizada.

El marcador R07 tenía una expectativa de 165 pb, pero se observaron resultados divergentes en las muestras. El material TONGONGON presentó dos amplificaciones a 133 pb y 177 pb. En el material MANGUINDANAO, se detectaron dos fragmentos de 120 pb y 133 pb. Para el material BUNGALONON, se observó un fragmento de 133 pb y otro de 176 pb. Por último, el material BRIBRI mostró dos fragmentos a 106 pb y 135 pb. Estas discrepancias también sugieren la existencia de variaciones genéticas en esta región.

En el caso del marcador R231, se esperaba un fragmento de 286 pb, pero los resultados revelaron fragmentos más cortos. El material TONGONGON presentó una amplificación a 223 pb, mientras que el material MANGUINDANAO mostró una amplificación de 224 pb. El material BUNGALONON presentó un solo fragmento de 226 pb, al igual que el material BRIBRI. Estos hallazgos indican una variabilidad genética en este marcador específico.

Para el marcador R45, se esperaba un fragmento de 275 pb, pero se observaron fragmentos ligeramente más largos. El material TONGONGON presentó un solo fragmento de 277 pb, y el material MANGUINDANAO obtuvo una amplificación de 276 pb. En el caso de BUNGALONON, se detectó un solo fragmento de 280 pb, y para el material BRIBRI, se obtuvo un amplicón de 278 pb.

En relación con el marcador R39, se esperaban fragmentos cercanos a 400 pb. El material TONGONGON mostró dos fragmentos, uno de 324 pb y otro de 355 pb. El material MANGUINDANAO presentó una amplificación de 327 pb, mientras que el material BUNGALONON mostró dos fragmentos, uno de 324 pb y otro de 356 pb. El material BRIBRI reveló dos amplicones de 318 pb y 352 pb. Estas diferencias en las longitudes sugieren una diversidad genética en esta región.

El marcador R264 tenía una expectativa de 274 pb, pero se observaron fragmentos más cortos en todas las muestras. El material TONGONGON presentó tres fragmentos de 180 pb, 207 pb y 225 pb. El material MANGUINDANAO obtuvo cuatro amplificaciones de 186 pb, 210 pb, 230 pb y 248 pb. El material BUNGALONON presentó tres fragmentos de 189 pb, 210 pb y 228 pb, y el material BRIBRI mostró dos amplicones de 211 pb y 230 pb.

Por último, en el marcador R150, se esperaba un fragmento de 270 pb, pero se observaron fragmentos más largos en todas las muestras. El material TONGONGON presentó un solo fragmento de 355 pb, al igual que el material MANGUINDANAO. El material BUNGALONON mostró un solo fragmento de 354 pb, y el material BRIBRI presentó un amplicón de 356 pb.

Los resultados obtenidos revelan diferencias notables en las longitudes de los fragmentos obtenidos para cada material al utilizar los mismos marcadores. Esta variabilidad en las longitudes de los fragmentos sugiere la presencia de diferencias genéticas significativas entre los materiales analizados y respalda la hipótesis de que es posible diferenciar posibles variedades de abacá mediante el análisis de marcadores genéticos.

Es importante destacar que no solo se observaron diferencias en la longitud de los fragmentos, sino también la presencia de múltiples amplicones en algunos materiales utilizando el mismo marcador. Esto es particularmente relevante, ya que la detección de múltiples amplicones sugiere una mayor complejidad genética en esos materiales. Cuanto más distintos sean estos amplicones, mayor será la evidencia de diferenciación genética entre los materiales (Patil et al., 2021).

Por ejemplo, el marcador R40 reveló múltiples amplificaciones en el material BRIBRI, con tamaños de 178 pb, 212 pb y 228 pb. Estas diferencias en las longitudes y la presencia de múltiples amplicones en el mismo material indican una variabilidad genética notable. Por lo tanto, el marcador R40 podría ser una herramienta valiosa para diferenciar variedades de abacá debido a su capacidad para detectar diferencias genéticas significativas (Marimuthu et al., 2019).

Por otro lado, algunos marcadores como el R231 mostraron resultados más homogéneos, con fragmentos de longitud similar en todos los materiales. Estos marcadores pueden ser menos útiles para la diferenciación de variedades, ya que no proporcionan una discriminación clara entre los materiales y muestran menos complejidad genética en los amplicones (Gaikwad et al., 2023).

En resumen, la presencia de diferencias en las longitudes de los fragmentos y la detección de múltiples amplicones utilizando los mismos marcadores genéticos respaldan la idea de que es posible diferenciar posibles variedades de abacá mediante análisis genéticos. Los marcadores que muestren diferencias notables en las longitudes de los fragmentos y la complejidad genética en los amplicones podrían ser especialmente prometedores para futuros estudios de identificación de variedades de abacá. Estos hallazgos tienen el potencial de contribuir significativamente a la conservación y el manejo genético de esta importante planta.

9.2.1.4 Conclusiones del estudio molecular

El presente estudio de identificación de variedades de abacá mediante análisis de marcadores genéticos ha arrojado resultados prometedores que contribuyen al entendimiento de la diversidad genética en esta planta. Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

Diversidad Genética: Los resultados demuestran una considerable variabilidad genética entre las diferentes variedades de abacá analizadas. Esta variabilidad se refleja en las diferencias en las longitudes de los fragmentos y la detección de múltiples amplicones utilizando los mismos marcadores genéticos.

Herramientas de Identificación: Los marcadores que mostraron las mayores diferencias en las longitudes de los fragmentos y la complejidad genética en los amplicones son candidatos ideales para la diferenciación de variedades de abacá. Específicamente, los marcadores R40 y R264 se destacan por su capacidad para detectar diferencias genéticas significativas.

Potencial de Conservación: La información genética obtenida en este estudio tiene un gran potencial para la conservación y el manejo genético de las variedades de abacá. Esta diversidad genética podría utilizarse para desarrollar estrategias de conservación y selección de variedades resistentes o con características deseables.

9.2.1.5 Recomendaciones del estudio molecular de cultivares de abacá

Basándonos en los resultados y conclusiones obtenidos, se recomienda ampliar el muestreo para incluir un mayor número de variedades de abacá y realizar secuenciación genómica de las regiones de interés para identificar mutaciones específicas. Además, se sugiere diseñar y validar marcadores genéticos específicos que permitan una identificación precisa de las variedades, aprovechando la diversidad genética detectada. Estos hallazgos podrían ser aplicados en estrategias de conservación, mejoramiento genético y colaboraciones internacionales para fortalecer los esfuerzos de conservación y manejo genético de abacá, contribuyendo así tanto a la biodiversidad como a la industria de esta fibra vegetal.

Bibliografía

Aleksić, J. M., Stojanović, D., Banović, B., & Jančić, R. (2012). A simple and efficient DNA isolation method for *Salvia officinalis*. *Biochemical Genetics*, 50, 881-892.

Gaikwad, A. B., Kumari, R., Yadav, S., Rangan, P., Wankhede, D. P., & Bhat, K. V. (2023). Small cardamom genome: development and utilization of microsatellite markers from a draft genome sequence of *Elettaria cardamomum* Maton. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1161499.

Ishii, K., & Fukui, M. (2001). Optimization of annealing temperature to reduce bias caused by a primer mismatch in multitemplate PCR. *Applied and environmental microbiology*, 67(8), 3753-3755.

Marimuthu Somasundaram, S., Subbaraya, U., Durairajan, S. G., Rajendran, S., Gopalakrishnan, J., Shahul Hameed, B. & Suthanthiram, B. (2019). Comparison of two different electrophoretic methods in studying the genetic diversity among plantains (*Musa* spp.) using ISSR markers. *Electrophoresis*, 40(9), 1265-1272.

Pachchigar, K. P., Khunt, A., & Hetal, B. (2016). DNA quantification. *ICAR Spons summer Sch Allele Min Crop Methods Util*, 4-7.

Patil, P. G., Singh, N. V., Bohra, A., Raghavendra, K. P., Mane, R., Mundewadikar, D. M., ... & Sharma, J. (2021). Comprehensive characterization and validation of chromosome-specific highly polymorphic SSR markers from pomegranate (*Punica granatum* L.) cv. Tunisia genome. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 645055.

Porta, A. R., & Enners, E. (2012). Determining annealing temperatures for polymerase chain reaction. *The American Biology Teacher*, *74*(4), 256-260.

Van Wieren-De Wijer, D. B. M. A., Maitland-van der Zee, A. H., de Boer, A., Belitser, S. V., Kroon, A. A., De Leeuw, P. W. & Klungel, O. H. (2009). Determinants of DNA yield and purity collected with buccal cell samples. *European journal of epidemiology*, *24*, 677-682.

9.2.2 Protocolo de introducción *in vitro* de explantes de cormos de abacá provenientes de los cultivos en el campo

9.2.2.1 Desinfección de explantes

Se deben seleccionar hijuelos viables para la introducción en laboratorio, se eliminan las partes del cormo y las vainas foliares hasta obtener segmentos de 3 a 5 cm que encierren ápices (Fig 12. A). Estos segmentos, serán utilizados como explantes. Posterior a esto, los segmentos se colocan en un beaker y se adiciona una solución de jabón comercial y se mantiene en agitación durante 10 minutos. Luego se descarta la solución con jabón y se agrega una solución de agroquímicos (Agri-mycin 16.5 WP y Benomil con 5 g/L de cada uno). Esta solución se deja actuar durante 15 minutos en agitación constante junto a los segmentos. Luego se descarta la solución y los segmentos se lavan con agua destilada estéril dos veces consecutivas. Posterior se adiciona una solución de hipoclorito de sodio al 5,25% a los segmentos en un beaker, colocándolos en una cámara de flujo laminar y se mantienen durante 20 minutos en agitación constante. Luego se descarta la solución. Se realizan 3 lavados con agua destilada estéril. En una placa Petri se colocan los segmentos y se reduce el tamaño de los mismos a unos 2 o 3 cm cuidando no dañar o exponer el ápice. Luego se regresan al beaker, se les adiciona la solución de hipoclorito de sodio al 0.525% + Tween 20® (0,5% v/v.) al material y se deja actuar durante 15 minutos en agitación constante. Descartar la solución. Luego se realiza 3 lavados con agua destilada estéril. Nuevamente, en una placa petri, se reduce el tamaño del material hasta obtener un ápice 0,5 o 0,6 cm desde la base hasta su parte distal, ignorando las hojas (Figura 12 C). Luego se colocar en la solución de antioxidante (ácido ascórbico o ácido cítrico 100 mg/1) durante 10 minutos más. Completado este lapso, cortar los explantes por la mitad procurando segmentar simétrica y verticalmente el ápice, y sembrarlo en el medio de introducción.

9.2.2.2 Introducción de explantes *in vitro*

Explantes provenientes de la base de cormos de abacá, de 0,5-0,6 cm de largo conteniendo el meristemo (Figura 12 C y D), posterior a su desinfección, se colocan en un medio MS al 100% suplementado con los reguladores de crecimiento 2 mg/L BAP y 1 mg/L AIB, 30 g/L Sacarosa y 3,3 g/L del Gelificante Gellan Gellum® ajustando el pH a 5,7. Los explantes se colocan en recipientes de cultivo en el cuarto de crecimiento bajo condición de oscuridad por una semana y temperatura de 25-27 °C.

Luego de la primera semana se mantienen en condición de luz por aproximadamente 3-4 semanas según la respuesta morfogénica o formación de brotes.

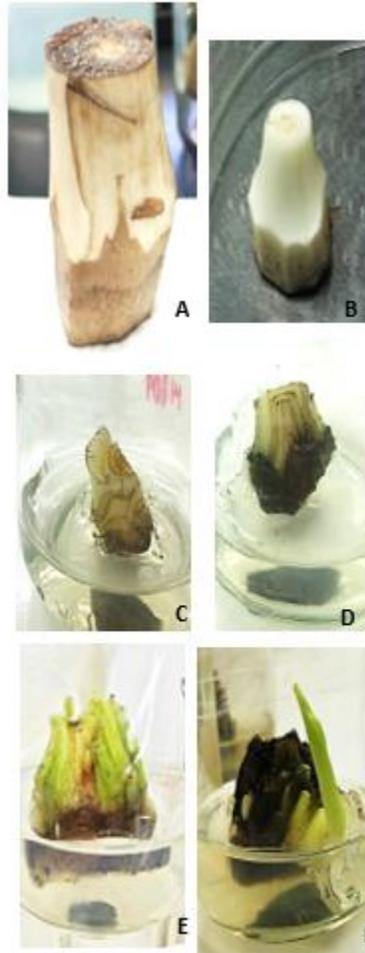


Figura 12. Explantes de abacá en diferentes estadios: A. explante utilizado en la desinfección, B. explante reducido utilizado en la introducción, C. explante recién sembrado en el medio de cultivo semi – sólido, D. explante con 1 semana de introducción, E, F. explantes a las 4 semanas, se observan los primeros brotes.

9.2.2.3 Multiplicación de explantes *in vitro*

Explantes con brotes de aproximadamente 4 semanas (Figura 13) de cultivo se colocan en placas Petri dentro de la cámara de flujo laminar y se realizan cortes en la base para promover la formación de múltiples brotes. El explante se divide a la mitad con un corte transversal, tomando como centro el meristemo antes de transferirlos al medio de cultivo. Para la multiplicación se utiliza el medio MS al 100% suplementado con 2 mg/L ANA, 5 mg/L BAP, 30 g/L Sacarosa y 3,3 g/L Gelificante Gellan Gellum®, ajustando el pH a 5,7. Los recipientes con los explantes se cultivan en condiciones de luz de 2000 lux y temperatura de 25-27 ° por 3-4 semanas hasta su próximo subcultivo.

La figuras 14 y 15 muestran los resultados de crecimiento de los explantes en laboratorio del CIB.

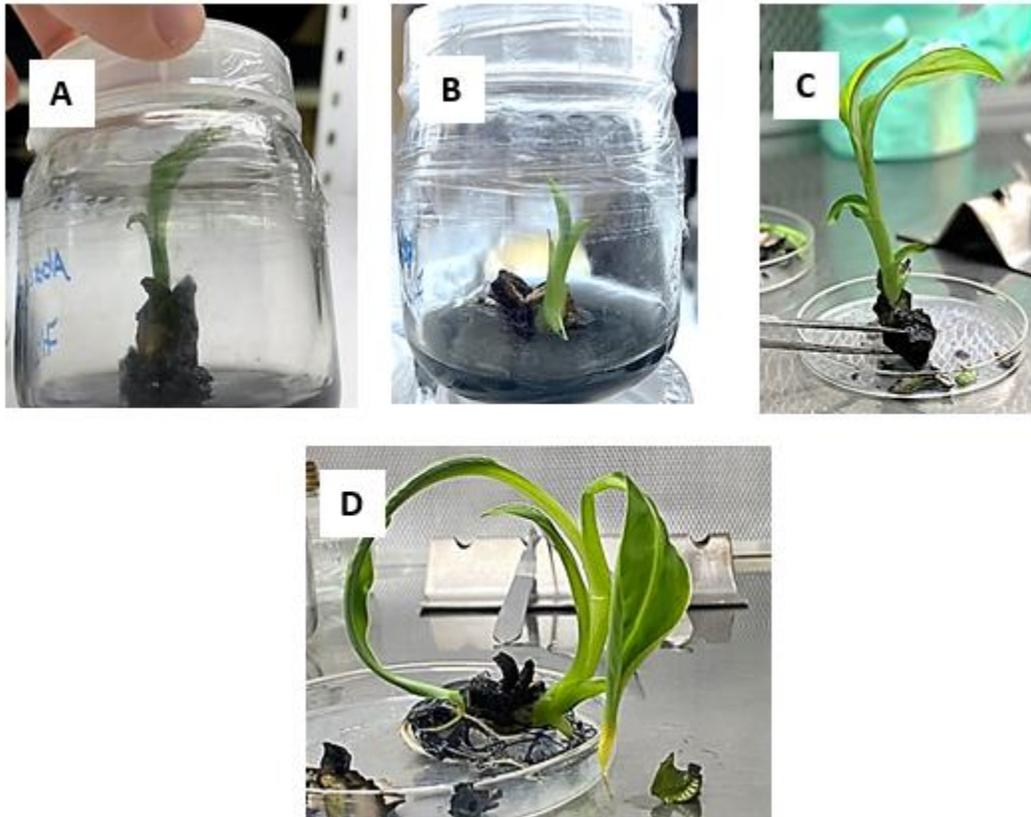


Figura 13. A, B, C, y D plantas *in vitro* de 3-4 semanas de cultivo en medio de introducción, establecidas en el laboratorio a partir de meristemas de los cormos de abacá.



Figura 14. Brotes de plántulas de abacá de 8 semanas de cultivo en medio semisólido de multiplicación, listos para pasar a medio líquido.

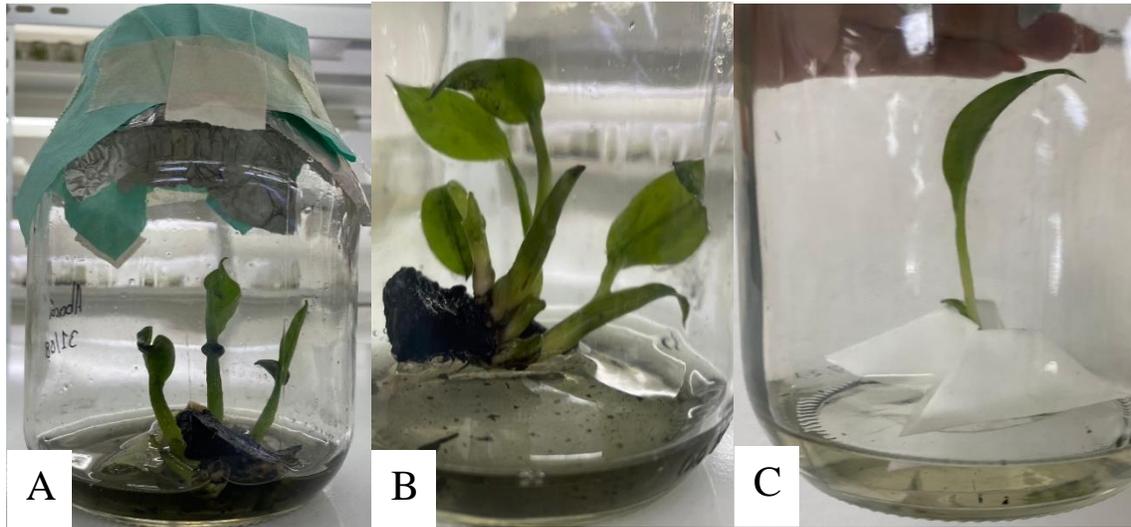


Figura 15. A y B. Brotes de plántulas de abacá de 6-8 semanas en medio de cultivo líquido; C plantas *in vitro* de abacá en medio líquido con soportes para cultivo en medio líquido.

9.2.2.4 Discusión de los resultados de la propagación *in vitro*

A partir de las metodologías implementadas para la desinfección, cultivo y multiplicación *in vitro* de explantes de abacá se ha logrado un desarrollo exitoso de brotes y plantas *in vitro* tanto en medio semisólido como líquido. Los reactivos seleccionados para la desinfección fueron eficaces a pesar de la alta carga microbiana encontrada en los cormos de campo. Cabe señalar que después de varios intentos de introducción frustrados por la gran cantidad de contaminación observada en los cultivos *in vitro*, se decidió implementar un tratamiento de exposición al sol de los cormos provenientes de campo con el fin de reducir la humedad y con esto la carga microbiana. Alternativamente podría utilizarse la técnica de desinfección de cormos y cultivo en invernadero de estos en sustratos tratados con agentes antimicrobianos. Sin embargo, este tratamiento previo no fue seleccionado en vista que requería mayor costo y tiempo.

Por otro lado, los protocolos planteados para la introducción *in vitro* resultaron eficaces mostrando tasas de 5-10 brotes por explante y tiempos de respuesta de 3-4 semanas. La producción de las plantas *in vitro*, bajo las condiciones implementadas de temperatura, luz y medio de cultivo ha requerido tiempos de entre 8 y 12 semanas. Posterior a esto el enraizamiento se genera de forma adecuada sin requerir ningún suplemento adicional al medio de multiplicación. Las *in vitro* plantas se pueden obtener en estados adecuados de endurecimiento para realizar su fase de aclimatación en invernadero, a partir de las 12 semanas.

9.2.2.5 Resultados y conclusiones de la propagación *in vitro*

- Se ha logrado implementar un protocolo eficiente de desinfección de cormos de plantas de abacá obtenidos en el campo y explantes para introducción *in vitro*.
- Se logró implementar un protocolo de introducción de explantes *in vitro* de abacá y hay disponibilidad de material para las nuevas plantaciones a través de viveros del INTA, y también a través de TEC y CeniBiot.

- Se logró la implementación de un protocolo eficiente para la multiplicación de explantes y producción de plantas de abacá *in vitro*.
- Es importante disponer de material *in vitro* para continuar con los ensayos de rendimiento, calidad de fibra y resistencia a enfermedades, asociado a los resultados de este proyecto sobre la caracterización molecular.
- El uso de material *in vitro* libre de patógenos es consecuente con los esfuerzos del país para prevenir el ingreso de la enfermedad *Fusarium* raza 4 tropical (Foc R4T).

9.2.3 Capacitación a personas productoras para atender la resolución DSFE-004-2019 sobre prevención de la enfermedad *Fusarium* raza 4 tropical (Foc R4T) y obtención de permisos del SFE

Al inicio del proyecto en el 2020, ya habían transcurrido varios meses de la vigencia del decreto de la Dirección Ejecutiva del Servicio Fitosanitario del Estado, comunicado mediante resolución DSFE-004-2019 sobre las medidas fitosanitarias para la prevención de la enfermedad *Fusarium* raza 4 tropical (Foc R4T) y que incluye a todas las especies de la familia de las musáceas. Esto generó una serie de medidas que tuvieron que implementarse en las fincas y con los productores, entre ellas, la construcción de pediluvios, los protocolos de desinfección de herramientas, la prohibición de trasiego de semilla tipo corno, entre otras. Es por ello, que en el 2020 las primeras actividades de capacitación iniciaron con las medidas de prevención dirigidas a productores, con la colaboración del MAG. En esta actividad también se tuvo la colaboración del personal técnico de la empresa Nippon Paper y las recomendaciones fueron incorporadas en el Manual de Productores que ha sido fundamental para las jornadas de capacitación.

En vigencia del proyecto se llevaron a cabo tres actividades de capacitación exclusivas sobre la desinfección de semillas tipo corno dentro de las fincas y la construcción de pediluvios en las fincas de los productores colaboradores del proyecto (ver Figura 16).



Figura 16. Detalles de capacitaciones y muestras de pediluvios de bajo costo establecidas en fincas de productores del proyecto en atención a la resolución DSFE-004-2019.

Por otra parte, es importante informar que la empresa Nippon Paper realizó un convenio específico con el INTA para el suministro de plantas *in vitro* a los productores, pero el proceso de obtención de semilla *in vitro* en cantidades suficiente para cubrir las necesidades de los productores no fue inicialmente el esperado, por consiguiente el TEC junto con Nippon Paper colaboraron en la tramitación de certificaciones de semilleros del Servicio Fitosanitario del Estado en tres fincas de productores del proyecto. Dentro de los protocolos se llevó a cabo un estricto control de la desinfección de los cornos (Figura 17).

A continuación, en la Tabla 9 se presenta el siguiente detalle de las áreas certificadas como semilleros:

Tabla 9. Áreas y propietarios que obtuvieron certificación del SFE para dedicar las áreas para suministro de semilla tipo cormo

Localidad	Propietario	Área certificada
Bataan, Matina	Kevin Espinoza Santana	2 ha
Islona, Siquirres	Eddy Molina Diaz	1 ha
Finca Agua, Sarapiquí	Emilio Ballesteros	4 ha



Figura 17. Desinfección de semilla de abacá tipo “cormo” procedente de las áreas semilleras certificadas por el SFE y embalaje en sacos para el transporte a fincas

9.3 Resultados del OE3. Analizar el comportamiento de biomateriales a partir de plástico reciclado y reforzados con fibra de abacá.

9.3.1 Caracterización de la fibra de abacá según cultivares y procedencia del material

Por primera vez en Costa Rica y por medio del proyecto de investigación del TEC, se llevó a cabo un estudio muy detallado sobre la caracterización de la fibra de abacá, considerando los diferentes cultivares que están en uso por parte de los productores. Este estudio es muy significativo porque orienta los esfuerzos a futuro del mejoramiento genético del cultivo. Los resultados fueron publicados en la revista *Polymers* con un Factor de Impacto de 4.967 y Q2. La cita del artículo es la siguiente:

Valverde, J.C.; Araya, M.; Arias-Aguilar, D.; Masís, C.; Muñoz, F. Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of *Musa textilis* Fiber Grown in the Tropical Region. *Polymers* 2022, 14, 1772. <https://doi.org/10.3390/polym14091772>

El enlace a la publicación es el siguiente: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/9/1772>

Resumen

El conocimiento de las propiedades y características de la fibra de los genotipos de *Musa textilis* es clave para desarrollar y utilizar cultivares con propiedades homogéneas que permitan centrarse en productos o segmentos de mercado que generen valor añadido a la fibra. Por esta razón, el objetivo de este estudio fue determinar el uso óptimo de cinco genotipos de *M. textiles* disponibles en Costa Rica (MT01, MT03, MT07, MT11 y CF01), considerados de alta productividad en la región tropical de Costa Rica. Para ello se realizaron análisis anatómicos, físico-mecánicos, químicos y energéticos de estas fibras para definir si algún genotipo tiene las condiciones ideales para un uso específico. Los resultados mostraron diferencias entre los genotipos, obteniéndose diferencias significativas en las propiedades físico-mecánicas (tensión, retención de agua y color), propiedades químicas (holocelulosa, lignina, extractivos y valores elementales

de nitrógeno, carbono y azufre), y propiedades energéticas (volátiles, cenizas y análisis termogravimétricos del valor calórico), lo que dio lugar al establecimiento de dos grupos de genotipos con un grado de disimilitud del 35%. El primer grupo, compuesto por MT03 y MT01, presentaba características adecuadas para la producción de papel, materiales biodegradables y materiales compuestos. Por otro lado, el segundo grupo, formado por MT07, MT11 y CF01, presentaba propiedades adecuadas para textiles, fibras pesadas y bioenergía.

Article

Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of *Musa textilis* Fiber Grown in the Tropical Region

Juan Carlos Valverde ^{1,2,*}, Mónica Araya ², Dagoberto Arias-Aguilar ², Charlyn Masis ² and Freddy Muñoz ²

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Victoria 500, Concepción 4030000, Región del Bio-Bío, Chile

² Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago 30101, Costa Rica; monicka1914@gmail.com (M.A.); darias@tec.ac.cr (D.A.-A.); charlynmasis@outlook.com (C.M.); fmunos@tec.ac.cr (F.M.)

* Correspondence: juvalverde@udec.cl

Abstract: Knowing the genotypes of *Musa textilis* and its fiber production properties is key for developing cultivars with homogeneous properties and focusing on specific products or market segments that generate added value to the fiber. For this reason, the objective was to determine the optimal use of five genotypes of *M. textilis* (MT01, MT03, MT07, MT11, and CF01) with high productivity grown in the tropical region of Costa Rica. Therefore, anatomical, physical-mechanical, chemical, and energetic analyses were carried out on these fibers to define whether any genotype has the ideal conditions for a specific use. The results showed differences between the genotypes, obtaining significant differences in physical-mechanical properties (tension, water retention, and color), chemical properties (holocellulose, lignin, extractives, and elemental values of nitrogen, carbon, and sulfur), and energetic properties (volatiles, ash, and calorific value thermogravimetric analyses), which resulted in the establishment of two groups of genotypes with a dissimilarity degree of 35%. The first group, composed of MT03 and MT01, presented characteristics suitable for paper production, biodegradable materials, and composite materials. On the other hand, the second group, made up of MT07, MT11, and CF01, showed properties suitable for textiles, heavy-duty fibers, and bioenergy.

Keywords: physical properties; mechanical properties; energetic properties; chemical properties; Costa Rica



Citation: Valverde, J.C.; Araya, M.; Arias-Aguilar, D.; Masis, C.; Muñoz, F. Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of *Musa textilis* Fiber Grown in the Tropical Region. *Polymers* 2022, 14, 1772. <https://doi.org/10.3390/polym14091772>

9.3.2 Pruebas de extrusión de polímeros a nivel industrial para la incorporación de la fibra de abacá

El proyecto planteó dentro de sus objetivos realizar pruebas de extrusión de polímeros a nivel industrial para la incorporación de la fibra de abacá en el proceso de fabricación de diferentes productos a partir de plástico reciclado con la expectativa que una empresa nacional pudiera utilizar los resultados.



Las pruebas iniciales fueron realizadas con la colaboración de la empresa IPS que se dedica a la elaboración de productos a partir del uso de residuos de plásticos. Las investigaciones llevadas a cabo por el TEC permitieron la elaboración de un nuevo artículo científico que fue sometido a la revista *Fibers and Polymers* de Springer con Factor de Impacto 2,5. El artículo está en proceso de evaluación y lleva como título:

De: em.fipo.0.860e92.11bf834b@editorialmanager.com <em.fipo.0.860e92.11bf834b@editorialmanager.com> En nombre de Fibers and Polymers Editorial Office
Enviado el: viernes, 15 de septiembre de 2023 09:24
Para: Dagoberto Arias Aguilar <darias@itcr.ac.cr>
Asunto: Fibers and Polymers - Submission Notification to co-author - [EMID:c384ac0fc858d241]

Este mensaje proviene de un remitente externo

Este mensaje vino de fuera de su organización.

Re: "Effects of Musa textilis fiber loadings in physical-mechanical properties of recycled thermoplastic compounds"
Full author list: Freddy Muñoz-Acosta; Johanna Gaitán-Álvarez; Dagoberto Arias-Águilar; Juan Carlos Valverde; Giovanni Garro-Monge; Jesús Mora-Molina

Dear Dr Dagoberto Arias-Aguilar,

We have received the submission entitled: "Effects of Musa textilis fiber loadings in physical-mechanical properties of recycled thermoplastic compounds" for possible publication in *Fibers and Polymers*, and you are listed as one of the co-authors.

The manuscript has been submitted to the journal by Dr. MSc. Juan Carlos Valverde who will be able to track the status of the paper through his/her login.

If you have any objections, please contact the editorial office as soon as possible. If we do not hear back from you, we will assume you agree with your co-authorship.

Thank you very much.

With kind regards,

Springer Journals Editorial Office
Fibers and Polymers

Resumen

El desarrollo de materiales compuestos se ha convertido en una opción atractiva para incorporar los residuos termoplásticos en un modelo de economía circular; para ello se utilizan fibras naturales que mejoran las propiedades del biomaterial para ser compatible con múltiples sectores industriales. El estudio tuvo como objetivo evaluar la compatibilidad de la fibra de *M. textilis* combinada con plásticos reciclados como polietileno (PE) y polipropileno (PP) sin un agente reticulante mediante la caracterización de las propiedades físico-mecánicas. Se reforzaron PE y PP con cuatro cargas de fibra (0 como control, 10, 20 y 30%); se evaluaron las propiedades físicas (densidad, hinchamiento del espesor, absorción de agua e incremento de peso), mecánicas (módulo elástico dinámico, flexión estática y tracción) y específicas (módulo elástico específico y el módulo de flexión específico), además de caracterizar el punto de fallo en ensayo de tracción con microscopía electrónica de barrido (SEM) y grado de disimilitud entre tratamientos (termoplástico x cargas de fibra). En conjunto, estos resultados sugieren que el refuerzo con *M. textilis* mejoró las propiedades mecánicas entre un 5 y un 15% respecto al control; las propiedades específicas mostraron que los biomateriales reúnen condiciones para su uso a nivel industrial; el punto de fallo más común fue de tipo línea de río gruesa asociado a termoplásticos, mientras que cargas de fibra al 10 y 20% mostraron fallos asociados a espacios libres interfaciales. Por su parte, los tratamientos con una carga de fibra del 30% mostraron mejores propiedades asociadas a la resistencia. Sin embargo, se recomienda restringir su uso en exteriores o en condiciones de contacto prolongado con el agua. Finalmente, nuestros resultados demuestran que el refuerzo de termoplásticos reciclados con fibra textil de *M. textilis* mejora las propiedades del biomaterial, ampliando su potencial uso comercial.

Effects of *Musa textilis* fiber loadings in physical-mechanical properties of recycled thermoplastic compounds

Freddy Muñoz-Acosta¹, Johanna Gaitán-Álvarez¹, Dagoberto Arias-Aguilar¹, Juan Carlos

Valverde^{2*}, Giovanni Garro-Monge³, Jesús Mora-Molina⁴

1. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
2. Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
3. Escuela de Biología, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
4. Escuela de Química, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Corresponding autor: jvalverde@udec.cl

Acknowledgements: The authors would like to thank Vicerectoria de Investigación y Extensión of Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) for the financial support of the study in the project “*Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica*” (code 1401093), the technical staff of Centro de Investigación e Innovación Forestal (CIF) and the Microscopy Laboratory of TEC. Also, the IPS for supplying recycled thermoplastics and the extrusion process. Finally, the Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (INTA) for providing the abaca fiber.

Data availability: Not applicable.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

1 **Effects of *Musa textilis* fiber loadings in physical-mechanical properties of**
2 **recycled thermoplastic compounds**

3 **Abstract**

4 Developing composite materials has become an attractive option to incorporate thermoplastic
5 waste into a circular economy model; for that thing, natural fibers are used to improve the
6 properties of the biomaterial to be consistent with multiple industrial sectors. The study aimed to
7 evaluate the compatibility of *M. textilis* fiber combined with recycled plastics such as polyethylene
8 (PE) and polypropylene (PP) without a cross-linking agent by characterizing the physical-
9 mechanical properties. PE and PP were reinforced with four fiber loadings (0 as a control, 10, 20,
10 and 30%); the physical (density, thickness swelling, water absorption, and weight increment),
11 mechanical (dynamic elastic modulus, static bending, and traction) and specific (specific elastic
12 modulus and the specific flexural modulus) properties were evaluated, in addition to characterizing
13 the failure point in traction test with scanning electron microscopy (SEM) and degree of
14 dissimilarity between treatments (thermoplastic x fiber loadings). Overall, these results suggest
15 that reinforcement with *M. textilis* improved the mechanical properties between 5 and 15%
16 concerning the control; the specific properties showed that the biomaterials have conditions for
17 industrial-grade use; the most common failure point was coarse river line type associated with
18 thermoplastics, while fiber loadings at 10 and 20% showed failures associated with interfacial free
19 spaces. For its part, treatments with a 30% fiber loading showed better properties associated with
20 resistance. However, it is recommended to restrict its use outdoors or in conditions with prolonged
21 water contact. Finally, our results demonstrate that recycled thermoplastics reinforcement with *M.*
22 *textile* fiber improves the biomaterial's properties, expanding its potential commercial use.

23 **Keywords:** natural fiber, polypropylene, polyethylene, recycled thermoplastic matrix, extrusion.

24 1. Introduction

25 Since 1950, synthetic polymers have predominated in all industrial sectors worldwide [1], with an
26 annual production of over 300 million tons [2, 3]. Thermoplastic-type polymers have stood out for
27 their physical-mechanical properties and adaptability in low-cost mass-production systems [4, 5].
28 However, being a non-biodegradable material containing toxic polluting additives (e.g.,
29 phthalates, bisphenols, and per- and polyfluoroalkyl) and with inefficient management after end-
30 of-life has turned it into a contaminant for wildlife, ecosystems, and human populations [6]. For
31 this reason, research and development of alternative materials that reincorporate thermoplastic
32 waste into a circular economy model have been stimulated [7].

33 One of the most difficult challenges for reintroducing recycled thermoplastic is enhancing its
34 properties [8, 9]. Usually, recycled thermoplastics have poor mechanical resistance and are
35 susceptible to organic and polar solvents, limiting their use in industrial sectors and reducing
36 market use [10]; thus, developing composite materials in which natural fibers are an attractive
37 option [11]. Natural fiber is a renewable raw material, easy to produce, with low environmental
38 impact, and abundant on the planet [12, 13]. Additionally to the wide variability of types of fibers
39 with different physical-mechanical properties, they allow the development of different matrices
40 with properties according to industries with high-quality demands, such as aeronautics,
41 automotive, electronics, and textiles [6]. Previous studies by Habibi et al. [14], El-Sabbagh et al.
42 [15], Suvarna et al. [13], and Chen et al. [16] have evidenced that natural fiber-reinforced is
43 compatible with polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET),
44 polyurethanes (PUR), and polyamides (PA) thermoplastics.

45 Natural fibers such as *Musa textilis* (Abaca) have demonstrated their versatility in composite
46 material. For example, Valášet et al. [17] found that 70% of the chemical composition of the thread

47 is cellulose, with high mechanical resistance and salinity tolerance, making it an ideal option for
48 the paper, textile, and microelectronics industries. Barba et al., [18]. Ahmad et al. [19] considered
49 the low density of fiber (average 1.5 g cm^{-3}) with high tensile strength and elastic modulus (980
50 MPa and 40 GPa, respectively), allowing the development of low-weight resistant materials ideal
51 for the automotive and aerospace industries. Additionally, Bhardwaj et al. [20] considered a highly
52 compatible fiber with PP and PE thermoplastics with significant improvements in resistance and
53 flexibility in matrices.

54 However, matrix studies allow maintaining the biomaterial's stability under conditions of tension
55 and bending [21, 22]. In turn, to evaluate the non-use of coupling agents in the properties of the
56 composite material, this is a measure to reduce the use of chemicals and waste production phase
57 [20]. The possibility of using this type of composite materials is critical for tropical regions in
58 which 80% of thermoplastics are not recycled or reused [17, 23], and consecutively, there are ideal
59 environmental conditions for the development of *M. textilis* plantations, which opens up the
60 possibility to develop new industries under a circular economy concept [24]. Therefore, the study's
61 objective was to evaluate the compatibility of *M. textilis* fiber combined with recycled plastics
62 such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP) without a cross-linking agent by characterizing
63 the physical-mechanical properties.

64 2. Materials and methods

65 2.1 Materials

66 A mixture of the three *Musa textilis* genotypes (MT07, MT11, and CF01 clones) that previously
67 showed ideal physical, mechanical, and thermal properties of intensive-use composite materials
68 was used (details in Valverde et al. [25]). This material proceeded from a pilot plantation located
69 in Guápiles, Limón, Costa Rica ($10^{\circ}15' \text{ N}$, $83^{\circ}46' \text{ W}$), under a tropical rainforest climate (*Af*)

70 according to Köppen-Geiger classification, with an average temperature of 25°C and rainfall of
71 4000 mm yr⁻¹. IPS recycling company provided recycled thermoplastic polyethylene (PE) and
72 polypropylene (PP).

73 *2.2 Composite preparation*

74 *M. textilis* fibers were mechanically defibrated and dried (<20% humidity) according to
75 Gölthenboth and Mühlbauer methodology [26]; then, *M. textilis* fiber and thermoplastics were
76 homogenized and ground to produce a sieve with an average size of 9 mm. Regarding *M. textilis*
77 fiber used as a reinforcing agent, four loadings were considered: 0 (as control), 10, 20, and 30%.
78 As a result, three profiles with dimensions of 20 x 125 mm x 200 cm were produced for each
79 thermoplastic-fiber loading combination (n=32 per thermoplastic). Mechanical mixing with a
80 single 100 cm long mixing barrel and profiling with an industrial extruder that was adjusted and
81 profiling with an industrial extruder with a starting temperature set for PE of 275 °C and PP of 277
82 °C; the temperature increased by 370 °C for PE and 380 °C for PP during the profiling phase.

83 *2.3 Physical, mechanical, and specific properties*

84 Profiles were conditioned for 72 hours at 23°C and 50% relative humidity according to ASTM
85 D618-21 [27] standard. Consequently, they were cut and sized according to the ASTM standard
86 dimensions for each physical-mechanical test under a sampling of 10 replicates per variable. The
87 physical properties evaluated were density (ρ), thickness swelling (Ts), water absorption (Wa),
88 and weight increase (Wi). On the other hand, mechanical properties considered the dynamic
89 modulus of elasticity (MOE_f), modulus of elasticity (E_f), flexural stress (σ_f), and tensile stress (σ_T).
90 Finally, specific elastic modulus (E_{fm}) and flexural modulus (σ_{Tm}) were measured under specific
91 properties.

92 The ASTM D792-20 [28] stand was used for ρ measurement. In contrast, T_s , W_a , and W_i were
93 evaluated with the ASTM D570-22 [29] standard. Regarding MOE_f was determined using
94 Sylvatest Duo equipment, V_i based on the time of flight of the wave and the distance between the
95 transducers with a wave frequency of 22 kHz (Equation 1).

$$96 \quad MOE_f = V_i^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

97 Where MOE_f is the dynamic modulus of elasticity in flexion in MPa, ρ is the sample density in kg
98 m^{-3} and V_i is the wave velocity in $m s^{-1}$.

99 The bending test was performed under ASTM D790-17 [30] standard. a JBA-855 universal testing
100 machine (STX Radial Ambient, SL) with a deflectometer module. Then, E_f and σ_f were calculated
101 according to the equations specified within ASTM standards (Equations 3 and 4, respectively).
102 Finally, σ_T was tested in a universal testing machine model H10KT (Tinius Olsen Co.) using type
103 I samples with the dimensions and equation specified in ASTM D638-22 [31] (Equation 4).

$$104 \quad E_f = \frac{L^3 \cdot M}{4 \cdot b \cdot d^3} \quad (2)$$

$$105 \quad \sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3)$$

$$106 \quad \sigma_T = \frac{W}{A_o} \quad (4)$$

107 Where E_f is the modulus of elasticity in MPa, σ_f is the flexural stress in MPa, σ_T is the tensile stress
108 in MPa, M is the slope of the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve
109 in $N mm^{-1}$, L is the support span in mm, F is the load at a given point on the load-deflection curve
110 the force applied in N, b is the sample width in mm, d is the sample depth in mm, W is the load in
111 N, and A_o is the original cross-sectional area in mm^2 .

112 The specific properties E_{fm} (Equation 5) and σ_{Tm} (Equation 6) were estimated using Hull [32]
113 methodology based on the physical-mechanical test results.

114
$$E_{fm} = \frac{E_f}{\rho} \quad (5)$$

115
$$\sigma_{Tm} = \frac{\sigma_T}{\rho} \quad (6)$$

116 Where E_{fm} is the specific elastic modulus in MPa, σ_{Tm} is the specific tensile stress in MPa, E_f is
117 the flexural modulus in MPa, σ_T is the tensile stress in MPa and ρ is the sample density in kg m^{-3} .

118 *2.4 Scanning electron microscope characterization*

119 Scanning electron microscopy (SEM) examined the sample failure points in the σ_T test. A model
120 TM3000 SEM (Hitachi High-Tech Co.) was employed in Backscattered Shadow Detector (BSD)
121 mode. For the image capture morphology, samples were not coated or metalized, with a working
122 distance of 6.4-8.3 mm for PE samples and 5.9-7.5 mm for PP samples, using a voltage of 5.0 KV.

123 *2.7 Statistical analysis*

124 The study used a mixed model in which the thermoplastic and *M. textilis* fiber loadings were
125 treated as fixed effects, and the sample was treated as a random effect. Then, analysis of variance
126 (ANOVA) and the Tukey test were used to compare the differences between treatments. Similarly,
127 a Pearson correlation test was used to evaluate properties in each thermoplastic with a significant
128 relationship to fiber loading. Finally, a principal components analysis (PCA) and discriminant
129 analysis (DCA) were performed to quantify the degree of similarity between thermoplastic-fiber
130 loadings and explain the variance in the experiment. All analyses were done in R software version
131 4.2.2 [33] with a significance of 0.05.

132

133 **3. Results**

134 *3.1 Physical properties*

135 The ρ presented significant changes when applying *M. textilis* fiber loadings, with different
136 responses between thermoplastics (Table 1); PE composite material showed a ρ increase between
137 3 and 6% compared to control; in contrast, in PP composite materials, the ρ decreased between 2.1
138 to 6.9%. In the same way, the dimensional stability of each showed the same trend among
139 thermoplastics (Table 1). The increase in fiber loadings decreased the material stability, with a rise
140 of 112.8% in T_s , 120.1% in W_a , and 269.3% in W_i , where the 30% fiber load treatment presented
141 minor stability

142 **Table 1 is here.**

143 3.2 Mechanical and specific properties

144 In general terms, reinforced *M. textilis* fiber loadings improved the mechanical properties of
145 composite materials (Fig. 1). The MOE_f values (Fig. 1a) increased due to fiber loading between 7.5
146 to 36%; The 30% fiber load treatment had the highest values (average 4145.6 MPa). Likewise, σ_f
147 (Fig. 1b) showed an increased range of 10.5 to 50.6% compared to the control treatment,
148 reinforcing that the 30% fiber loading treatment obtained the maximum values (average 33749.5
149 MPa). On the contrary, E_f and σ_T (Fig. 1 c and 1d) reported a reduction with bout thermoplastics
150 reduction between 9.9 and 14.4% at 10 and 20% fibers loadings treatments, only 30% fiber loading
151 treatment presented non-significant differences with control treatment in PP and increment of
152 12.3% with PE composite materials.

153 **Figure 1 is here.**

154 The results of specific properties are presented in Figure 2. 10 and 20% fiber loading treatments
155 showed an average loss of 22.5% in E_{fm} (Fig. 2a) and 11.9% in σ_{Tm} (Fig. 2b). Instead, the 30%

156 fiber loading treatment showed a significant increase average of 10.3% in E_{fm} (Fig. 2a) and 6.8%
157 in σ_{Tm} (Fig. 2b) concerning the control treatment.

158 **Figure 2 is here.**

159 *3.3 Fracture morphology by SEM*

160 The analysis of failure points by SEM (Fig. 3) showed the following results: (i) the control
161 treatments (0% fiber loading) showed multiple coarse river lines and scraps associated with the
162 porosity of each thermoplastic (Fig. 3a and 3e); (ii) 10 and 20% fiber loadings treatments presented
163 failures associated with interface free space and fiber pull out, due to fiber conglomerates product
164 of an inhomogeneous mixture (Fig 3b, 3c, 3f and 3g), (iii) 30% fiber loading treatment exhibited
165 a reduction of fiber pull out and scraps, being the failures associated with the thermoplastic
166 component (Fig. 3d and 3h), and (iv) all reinforced treatments were evident that fiber granulation
167 and crushing allowed a similarity in the fiber size; however, a change in the extrusion stage must
168 be considered, given that the direct method produced fiber conglomerates.

169 **Figure 3 is here.**

170 *3.5 Dissimilarity between fiber loading and thermoplastic treatments*

171 The Pearson correlation analysis (Fig 4a) showed a strong positive correlation in T_s , W_a , σ_T and
172 E_{fm} (r-values between 0.72 to 0.90, p -value< 0.05) properties and a negative correlation with
173 MOE_f , E_f and E_{fm} variables (r-values between -0.78 to -0.82, p -value< 0.05) in the fiber loading
174 treatments used in both thermoplastics. The PCA test explained 88.83% of the variability (Fig.
175 4b). The first PCA component accounted for 58.49% of the variation, where MOE_f -values showed
176 the highest weight contribution in the first axis, in the case of the second PCA component
177 accounted for 30.3% of the variation, with an influence of σ_T values. Therefore, the DCA

178 segregated the thermoplastic-fiber loading treatments into three groups: (i) PP-0 and PE-0; (ii) PP-
179 10, PP-20, PE10, and PE-20; and (iii) PP-30 and PE-30.

180 **Figure 4 is here.**

181 **4. Discussion**

182 *4.1 Effect of *M. textilis* fibers reinforcement*

183 *M. textilis* fiber reinforcement modified most physical-mechanical properties studied. The first
184 aspect to highlight was how the density of the composite material varied between thermoplastics;
185 Valášek et al. [17] mentioned that PE had a higher density than PP (0.95 and 0.75 g cm⁻³,
186 respectively), which significantly impacts the extrusion phase. Interestingly, density alteration
187 makes it easier to adjust the composite materials, offering greater commercial application
188 flexibility [5]. On the other hand, the changes in dimensional stability (T_s , W_a , and W_i) could be a
189 result of the hydrophilic nature of *M. textilis* fibers [18]; also, the porosity generated from free
190 spaces between the thermoplastic and natural fiber affects the entry and retention of water [24]. As
191 a result, when natural fibers are used in composite materials, they could affect the overall
192 performance and durability of the material [16]; therefore, it is generally recommended to restrict
193 this type of composite materials in interior products or low exposure to humidity conditions [22],
194 as well as the use of hydro-stabilizers or isolating chemicals allow their use outdoors [7]. However,
195 they must impact the production costs of composite material and the recycling processes after end-
196 of-life [2].

197 A somewhat remarkable aspect was the increment of mechanical properties (Figure 2); the fiber
198 loading increased the bending of biomaterial, agreeing with previous studies of Bledzki et al. [24]
199 and Suvara et al. [13]. However, our results showed that fiber loading of 10 and 20% showed the
200 lowest values in MOE_f and E_f ; this answer is due to the high stickiness of the recycled thermoplastic

201 [2], and the polarity of the fiber could reduce the dispersion of the fiber in the matrix (e.g., fiber
202 clusters), strongly affecting the resistance of the biomaterial and the generation of free spaces
203 (Figure 4) that are potential points of failure [20]. Several authors also reported this weak point
204 where the σ_T value tends to decrease, arguing a low dispersion of the fiber in the matrix [9, 34]. In
205 contrast, Kumar et al. [35] reported an increment of mechanical properties in polymeric composites
206 reinforced with *M. textilis* fiber. Similarly, Chen et al. [16] demonstrated that in polypropylene
207 reinforced with natural fiber, the tensile and flexural strength values increased by 21 and 27%,
208 respectively. Our results reinforced the conclusion of Miyahara et al. [36] that natural fiber could
209 increase tensile strength by 10 to 25% in recycled composite materials with PP plastic.

210 4.2 Considerations and limitations of composite materials

211 SEM was an excellent technique to characterize composite materials' fiber morphology, fracture,
212 and pull-out effect [9, 37], which could characterize the physical-mechanical properties of
213 polymeric compounds [38]. Our results confirmed the similitude of fiber size and their interaction
214 with PP and PE. Maiti and Singh [39] examined compound materials with HDPE without a
215 coupling agent and determined an increase in elastic modulus with smaller and similar fiber sizes.
216 In contrast, Chen et al. [16] concluded that fiber dispersion is more critical than fiber size due to
217 the heterogeneity of composite material and generation of failure points. Finally, Nourbakhsh et
218 al. [40] studied the effect of fiber size with PP in composite materials and found that fiber size did
219 not significantly affect the tensile modulus.

220 On the other hand, Saini et al. [37] mentioned that the principal variable to consider in the quality
221 and resistance of complaint materials is the degree of adhesion between the thermoplastic-fiber
222 loading and the fiber dispersion. For *M. textilis* fiber-reinforced composites, the tensile strength
223 decreases with fiber loading [41]. As the fiber loading increases, the interfacial area between the

224 fiber and the thermoplastic matrix weakens. This point was confirmed by Saini et al. [37],
225 composite materials with high tears/breaks and defibrillation presented in treatments with poor
226 adhesion thermoplastic fiber and high free space and scraps.

227 4.3 Considerations for composite materials use

228 Regarding American Plastic Lumber (<https://american-plasticlumber.com>), standards for recycled
229 composite materials require a σ_{Tm} value of >9 MPa and E_{fm} values of >295 MPa to consider an
230 industrial grade use. Our composite materials met these standards due to the high mechanical
231 resistance of the *M. textilis* fiber [12]. Generally, The properties of the composite material and its
232 potential for use depend on the physical-mechanical properties of the natural fiber [4, 22], fiber
233 loading in the matrix [9], degree of cohesion between fiber-thermoplastic [1], and adaptability of
234 the materials to the extrusion method used [13].

235 For example, Ahmad et al. [19] found more than 50 combinations with entirely different
236 mechanical properties by changing the concentrations of natural fiber, intercourse agent, and
237 recycled PE, obtaining exciting materials for construction, packaging, aeronautics, and furniture.
238 Interestingly, Ochi et al. [8] observed that loading of 70% of Manila hemp fiber produces a
239 composite material with high tensile and flexural strengths (365 MPa and 223 MPa, respectively)
240 with industrial use with the advantage of being a biodegradable composite material that annually
241 could reduce between 10 and 30% of GHG emissions compared to the traditional materials used.
242 Likewise, Tian et al. [23] concluded that composite materials from natural fibers are an attractive
243 option for the biomedical industry, given that the materials currently used are not biodegradable,
244 their waste is hazardous, and waste management protocols are logistically complex and expensive;
245 Considering this alternative must reduce the complexity of biomedical waste given the possibility
246 that it is biodegradable. Finally, Shlykov et al. [10] conclude that fibers with high cellulose content

247 adversely affected composite material's strength and slight flexibility; therefore, it is recommended
248 to use fibers with high lignin content for composite materials with industrial use that must
249 withstand high loads.

250 **5. Conclusions**

251 It is possible to obtain a composite material by the extrusion method using recycled thermoplastic
252 type PP and PE with *M. textilis* fiber reinforcement. Although the physical properties associated
253 with dimensional stability in humid conditions may be affected, its use is recommended indoors,
254 in environments with low water exposure, or using hydrophobic treatments. Furthermore, using
255 fiber loading improved most of the mechanical properties, with 30% fiber loading obtaining the
256 best results for both thermoplastics.

257 Another aspect to consider is that the composite materials met the range of specific properties for
258 industrial grade use (according to American Plastic Lumber), which a point to improve before
259 being marketed is to improve the extrusion process to reduce the accumulation of fibers in the
260 matrix. Finally, the satisfactory results demonstrate the potential for developing this type of
261 composite materials in tropical regions as an attractive option to stimulate the adoption of a circular
262 economy model for thermoplastic waste.

263 **References**

- 264 1. S. A. Sell, P. S. Wolfe, K. Garg, J. M. McCool, I. A. Rodriguez, and G. L. Bowlin, *Polymers*,
265 **2**, 522 (2010).
- 266 2. R. Dziuba, M. Kucharska, L. Madej-Kielbik, K. Sulak, and M. Wiśniewska-Wrona, *Materials*,
267 **14**, 7704 (2021).
- 268 3. K. A. Boluk, C. T. Cavaliere, and F. Higgins-Desbiolles, "A critical framework for interrogating
269 the United Nations Sustainable Development Goals 2030 Agenda in tourism", Taylor & Francis,
270 2019.

- 271 4. A. L. Naidu, V. Jagadeesh, and M. Bahubalendrumi, *International Journal of Advanced*
272 *Research in Engineering and Technology*, **8**, 56 (2017).
- 273 5. L. Yan, B. Kasal, and L. Huang, *Composites Part B: Engineering*, **92**, 94 (2016).
- 274 6. W. Wang, B. Ji, C. Zhang, and X. Cao, *Inorganic Chemistry Communications*, **67**, 55 (2016).
- 275 7. D. Qin, S. Bi, X. You, M. Wang, X. Cong, C. Yuan, M. Yu, X. Cheng, and X.-G. Chen,
276 *Chemical Engineering Journal*, **428**, 131102 (2022).
- 277 8. S. Ochi, *Composites part A: Applied science and manufacturing*, **37**, 1879 (2006).
- 278 9. V. Gulitah and K. C. Liew, *International Journal of Biobased Plastics*, **1**, 22 (2019).
- 279 10. S. Shlykov, R. Rogulin, and S. Kondrashev, *Curved and Layered Structures*, **9**, 116 (2022).
- 280 11. D. Almpani-Lekka, S. Pfeiffer, C. Schmidts, and S.-i. Seo, *Fungal Biology and Biotechnology*,
281 **8**, 17 (2021).
- 282 12. J. C. Valverde, M. Araya, D. Arias-Aguilar, C. Masís, and F. Muñoz, *Polymers*, **14**, 1772
283 (2022).
- 284 13. A. S. Suvarna, A. Katagi, J. Pasanna, S. Kumar, B. Bennehalli, P. V. Badyankal, and S. K.
285 Vasudeva, *Material Science Research India*, **12**, 54 (2015).
- 286 14. Y. Habibi, W. K. El-Zawawy, M. M. Ibrahim, and A. Dufresne, *Composites Science and*
287 *Technology*, **68**, 1877 (2008).
- 288 15. A. El-Sabbagh, *Composites Part B: Engineering*, **57**, 126 (2014).
- 289 16. D. Chen, C. Pi, M. Chen, L. He, F. Xia, and S. Peng, *Polymer Composites*, **40**, 2681 (2019).
- 290 17. P. Valášek, R. D'amato, M. Müller, and A. Ruggiero, *BioResources*, **13**, 3177 (2018).
- 291 18. B. J. D. Barba, J. F. Madrid, and D. P. Penaloza Jr, *Journal of the Chilean Chemical Society*,
292 **65**, 4919 (2020).
- 293 19. F. Ahmad, H. S. Choi, and M. K. Park, *Macromolecular materials and engineering*, **300**, 10
294 (2015).
- 295 20. R. Bhardwaj, A. K. Mohanty, L. Drzal, F. Pourboghra, and M. Misra, *Biomacromolecules*, **7**,
296 2044 (2006).
- 297 21. F. Garcia-Zetina, E. Martinez, A. Alvarez-Castillo, and V. Castano, *Journal of reinforced*
298 *plastics and composites*, **14**, 641 (1995).
- 299 22. D. Nabi Saheb and J. Jog, (1999).
- 300 23. H. Tian, Z. Tang, X. Zhuang, X. Chen, and X. Jing, *Progress in Polymer Science*, **37**, 237
301 (2012).

- 302 24. A. Bledzki, A. Mamun, and O. Faruk, *eXPRESS polymer letters*, **1**, 755 (2007).
- 303 25. M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, *Hydrology and earth system sciences*, **11**,
304 1633 (2007).
- 305 26. F. Göltzenboth and W. Mühlbauer, *Industrial Applications of Natural Fibres*, 163 (2010).
- 306 27. ASTM, "Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing (D618-21)", American Society
307 For Testing and Materials, West Conshohocken (PA), 2021.
- 308 28. ASTM, "Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by
309 displacement (D792-20)", American Society For Testing and Materials, West Conshohocken
310 (PA), 2020.
- 311 29. ASTM, "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics (D570-22)", American Society
312 For Testing and Materials, West Conshohocken (PA), 2022.
- 313 30. ASTM, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced
314 Plastics and Electrical Insulating Materials (D790-17)", American Society For Testing and
315 Materials, West Conshohocken (PA), 2017.
- 316 31. ASTM, "Standard test method for tensile properties of plastics (D638-22)", American Society
317 For Testing and Materials, West Conshohocken (PA), 2022.
- 318 32. H. Derek, *Reverté, Barcelona*, (1987).
- 319 33. T. RC, "R: a language and environment for statistical computing", Vienna, Austria, 2023.
- 320 34. A. Kammarkar, S. Chauhan, J. M. Modak, and M. Chanda, *Composites Part A: Applied Science
321 and Manufacturing*, **38**, 227 (2007).
- 322 35. A. Khonsari, H. R. Taghiyari, A. Karimi, and M. Tajvidi, *Maderas. Ciencia y tecnología*, **17**,
323 545 (2015).
- 324 36. R. Y. Miyahara, F. L. Melquiades, E. Ligowski, A. d. Santos, S. L. Fávoro, and O. d. R. Antunes
325 Junior, *Polímeros*, **28**, 147 (2018).
- 326 37. G. Saini, R. Bhardwaj, V. Choudhary, and A. Narula, *Journal of Applied Polymer Science*, **117**,
327 1309 (2010).
- 328 38. Y. Li, *International Journal of Polymeric Materials*, **61**, 882 (2012).
- 329 39. S. Maiti and K. Singh, *Journal of Applied Polymer Science*, **32**, 4285 (1986).
- 330 40. A. Nourbakhsh, A. Karegarfard, A. Ashori, and A. Nourbakhsh, *Journal of Thermoplastic
331 Composite Materials*, **23**, 169 (2010).

332 41. M. Haque, R. Rahman, N. Islam, M. Huque, and M. Hasan, *Journal of reinforced plastics and*
333 *composites*, **29**, 2253 (2010).

334

Table 1. Physical properties of the composite material based on recycled polypropylene (PP) and polyethylene (PE) with four *M. textilis* fibers loading (0, 10, 20 and 30 %). (ρ =density, T_s = thickness swelling, W_a = water absorption, W_i = Weight increment. Values in parentheses correspond to standard error. Different letters indicate significant differences at 0.05).

Property	Fiber loading (%)	Thermoplastic	
		PE	PP
ρ (g cm ⁻³)	0	0.84 b (0.03)	0.94 a (0.03)
	10	0.87 a (0.02)	0.92 a (0.02)
	20	0.90 a (0.02)	0.91 a (0.03)
	30	0.88 a (0.03)	0.91 a (0.02)
T_s (%)	0	1.20 c (0.65)	1.71 c (0.55)
	10	3.80 b (0.65)	3.40 b (0.15)
	20	4.31 a (0.41)	3.61 a (0.57)
	30	4.72 a (0.18)	4.02 a (0.28)
W_a (%)	0	41.81 c (3.64)	16.12 c (4.75)
	10	47.19 b (6.96)	35.70 b (5.43)
	20	64.00 a (3.58)	55.70 a (5.55)
	30	68.11 a (4.93)	58.30 a (4.58)
W_i (%)	0	0.07 c (0.04)	0.06 c (0.05)
	10	0.09 c (0.03)	0.09 c (0.04)
	20	0.27 b (0.05)	0.14 b (0.04)
	30	0.32 a (0.04)	0.32 a (0.05)

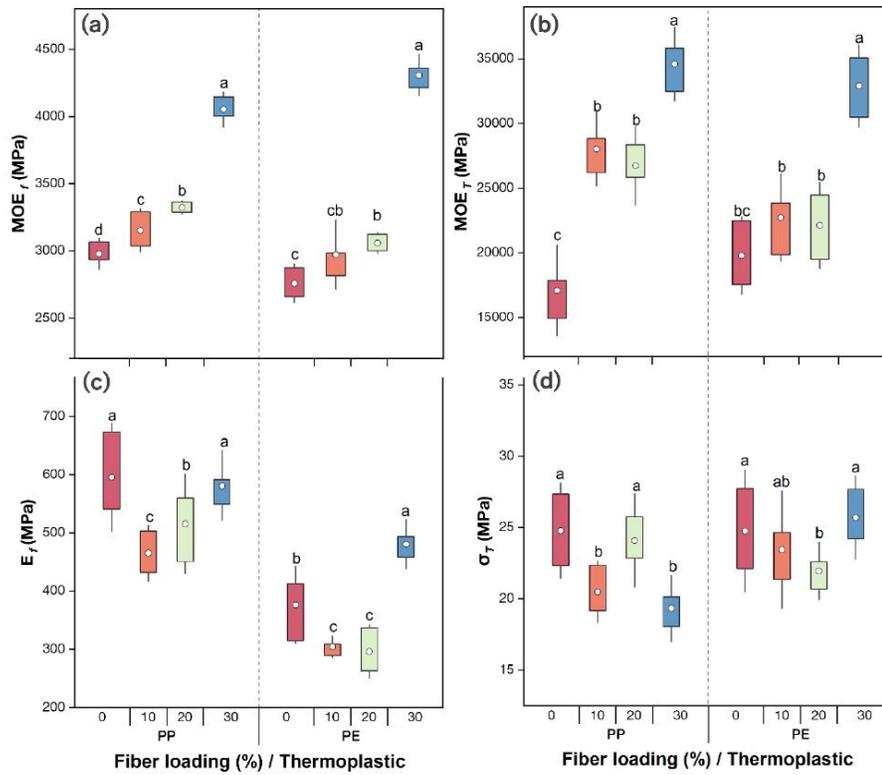


Figure 1. Box plot of MOE_f (a), MOE_T (b), E_f (c) and σ_T (d) values of per composite material based on recycled polypropylene (PP) and polyethylene (PE) with four *M. textilis* fiber loadings (0, 10, 20 and 30 %). (The white circle represents the average value; the whiskers represent the standard error, and different letters indicate significant differences at 0.05.)

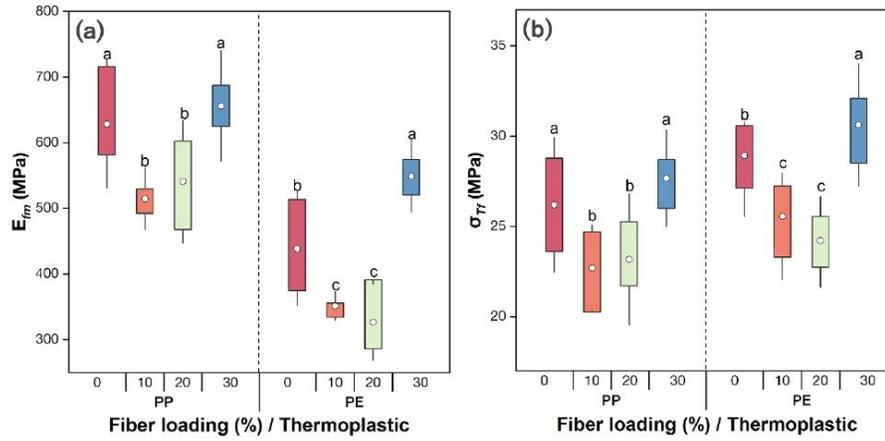


Figure 2. Box plot of E_{fm} (a) and σ_{Tf} (d) values of per composite material based on recycled polypropylene (PP) and polyethylene (PE) with four *M. textilis* fiber loadings (0, 10, 20 and 30%). (The white circle represents the average value; the whiskers represent the standard error, and different letters indicate significant differences at 0.05.)

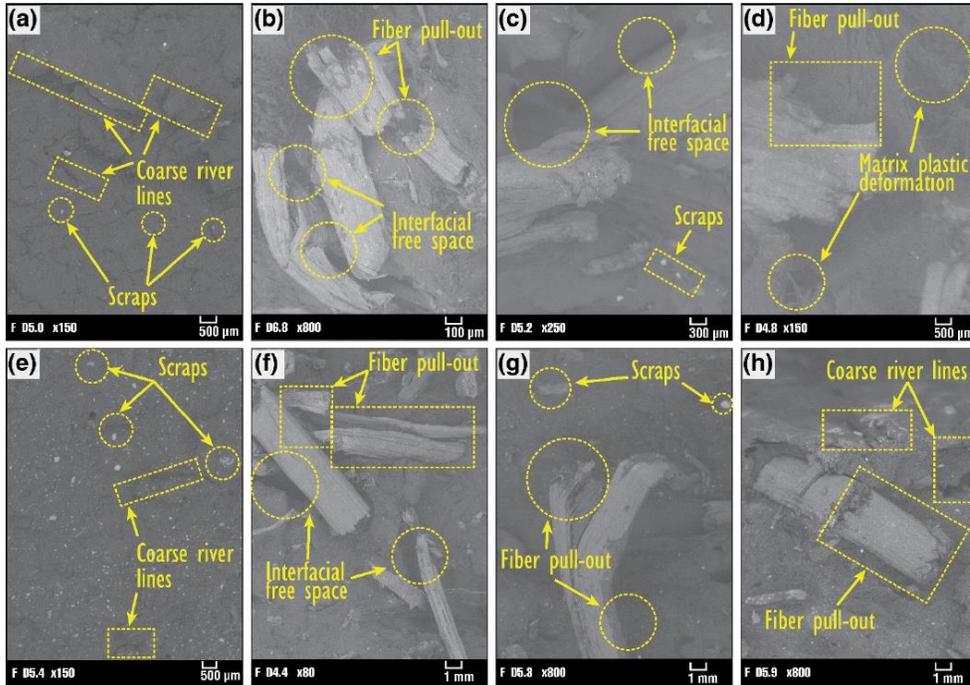


Figure 3. SEM photomicrographs of the types of fractures identified in the tensile test for PE (a, b, c, d) and PP (e, f, g, h) composite materials with *M. textilis* fiber loading at 0% (a and e), 10% (b and f), 20% (c and g) and 30% (d and h).

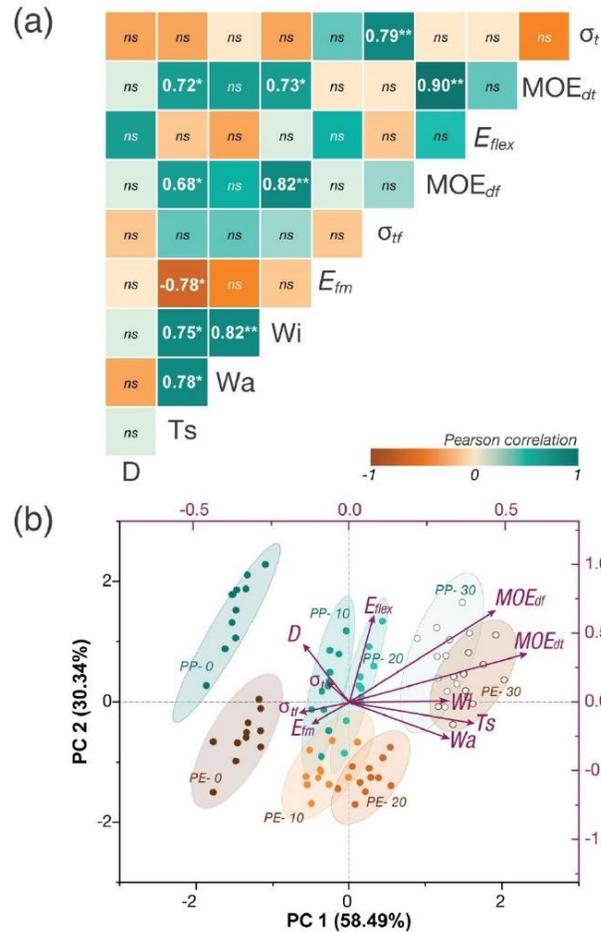


Figure 4. Pearson correlation coefficients (r) between physical-mechanical and specific properties (a), and biplot from PCA and DCA analysis of PE and PP thermoplastic reinforced with four *M. textilis* fiber loadings (0, 10, 20 and 30%). (ns represented non-significance, * significance at 0.05, ** significance at 0.01, and *** significance at 0.001)

9.3.3 Estudios de combinación de fibra con residuos de madera para elaboración de tableros de partículas de *Gmelina arborea roxb.* reforzados con fibra de *Musa textilis* Née (Entregable adicional).

De las experiencias y experimentos del uso de las fibras de abacá en combinación con plástico, se continuó trabajando en un nuevo experimento utilizando los residuos de madera de melina combinados con fibra de

abacá para elaborar tableros de partículas. Estos resultados no forman parte de los compromisos del proyecto de investigación, pero se lograron gracias al trabajo de tesis de maestría de la Ing. Mónica Araya Salas. El entregable para este informe está en formato de artículo científico titulado “Evaluación de prototipos de papel elaborados a partir de cinco genotipos comerciales de *Musa textilis* Née cultivados en la región tropical”, y está en proceso de traducción para presentar formalmente en una revista científica. A continuación, se presentan los detalles de los resultados obtenidos.

Resumen

Una forma relevante para darle de mayor valor agregado a la fibra de *M. textilis* producida en Costa Rica, es mediante el estudio de la aptitud físico-mecánica de las pulpas celulósicas y la calidad de prototipos de papel a partir de las diferencias entre genotipos. El presente estudio considera los procesos básicos a nivel de laboratorio para la manufactura de pulpa celulósica a partir de cinco materiales genéticos de *M. textilis* con capacidad de uso comercial, que incluye el proceso de pulpado básico con el método a la soda, la formación de láminas de papel de 22 x 28 cm; y la consiguiente caracterización química, físico-mecánica y energética de la pulpa y el papel. Los resultados mostraron que todas las pulpas presentaron una caracterización química óptima, con contenidos de lignina inferiores al 6% y de holocelulosa superiores al 90%; así como rendimientos superiores al 59%. A pesar de que la caracterización demostró que todas las pulpas presentaron diferencias estadísticas, se puede concluir que todas las pulpas pueden destinarse para uso comercial de papeles altamente porosos como filtros y tipo tisú. Específicamente, la pulpa IA17 fue la que presentó las mejores características mecánicas; por lo cual, la aplicación de un protocolo más intenso de refinamiento podría permitir el uso de la fibra y sus subproductos para la producción de papel sin blanquear para bolsas y empaques por su resistencia.

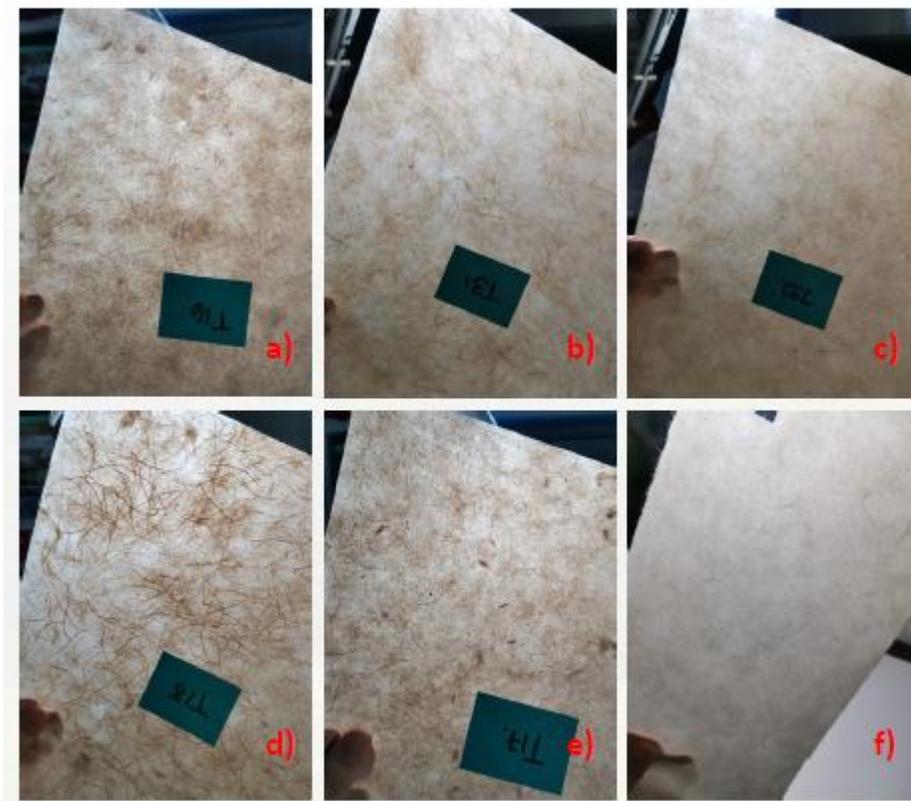


Figura 18. Diferentes prototipos de papel a partir de fibra de abacá

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DE PROTOTIPOS DE PAPEL ELABORADOS A PARTIR DE CINCO GENOTIPOS COMERCIALES DE *Musa textilis* Née CULTIVADOS EN LA REGIÓN TROPICAL

Mónica Araya-Salas ^{1 *}, Dagoberto Arias-Aguilar ² & Juan Carlos Valverde ³

Resumen

Una forma relevante para darle de mayor valor agregado a la fibra de *M. textilis* producida en Costa Rica, es mediante el estudio de la aptitud físico-mecánica de las pulpas celulósicas y la calidad de prototipos de papel a partir de las diferencias entre genotipos. El presente estudio considera los procesos básicos a nivel de laboratorio para la manufactura de pulpa celulósica a partir de cinco materiales genéticos de *M. textilis* con capacidad de uso comercial, que incluye el proceso de pulpado básico con el método a la soda, la formación de láminas de papel de 22 x 28 cm; y la consiguiente caracterización química, físico-mecánica y energética de la pulpa y el papel. Los resultados mostraron que todas las pulpas presentaron una caracterización química óptima, con contenidos de lignina inferiores al 6% y de holocelulosa superiores al 90%; así como rendimientos superiores al 59%. A pesar de que la caracterización demostró que todas las pulpas presentaron diferencias estadísticas, se puede concluir que todas las pulpas pueden destinarse para uso comercial de papeles altamente porosos como filtros y tipo tisú. Específicamente, la pulpa IA17 fue la que presentó las mejores características mecánicas; por lo cual, la aplicación de un protocolo más intenso de refinamiento podría permitir el uso de la fibra y sus subproductos para la producción de papel sin blanquear para bolsas y empaques por su resistencia.

*Autor de correspondencia

^{1, 2} Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago 30101, Costa Rica; Mónica Araya-Salas monicka1914@gmail.com (M.A.S.); Dagoberto Arias-Aguilar darias@itcr.ac.cr (D.A.A.)

³ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Victoria 500, Concepción 4030000, Región del Bio-Bío, Chile jvalverde@udec.cl (J.C.V.)

Palabras clave: *Musa textilis*, álcali, genotipo, pulpa, Costa Rica

Abstract

A relevant way to give greater added value to the *M. textilis* fiber produced in Costa Rica is through the study of the physical-mechanical aptitude of the cellulosic pulp and the quality of paper prototypes based on the differences between genotypes. The present study considers the basic processes at the laboratory level for the manufacture of cellulosic pulp from five *M. textilis* genetic materials capable of commercial use, which includes the basic pulping process with the soda method, the formation of 22 x 28 cm sheets of paper; and the consequent chemical, physical-mechanical and energetic characterization of the pulp and paper. The results showed that all the pulps presented an optimal chemical characterization, with lignin contents lower than 6% and holocellulose contents higher than 90%; as well as yields higher than 59%. Despite the fact that the characterization showed that all the pulps presented statistical differences, it can be concluded that all the pulps can be used for commercial use of highly porous papers such as filters and tissue type. Specifically, the IA17 pulp was the one that presented the best mechanical characteristics; therefore, the application of a more intense refining protocol could allow the use of the fiber and its residues for the production of unbleached paper for bags and packaging due to its resistance.

Key words: *Musa textilis*, alkali, genotype, pulp, Costa Rica

Introducción

La pulpa de celulosa, considerada la base estructural para la conformación del papel y el cartón, es manufacturada a partir de materias primas de origen vegetal; principalmente madera (Mannai *et al.*, 2017; Bajpai, 2018; Małachowska *et al.*, 2020; Khantayanuwong *et al.*, 2023). En la actualidad, la producción mundial de papel ha aumentado hasta rondar los 400 millones de toneladas métricas anuales (FAO, 2021; Otieno *et al.*, 2021; NagarajaGanesh *et al.*, 2023); y dicha área industrial, ha reportado un consumo de más del 35% de la producción maderera mundial (FAO, 2018; Jeetah & Jaffur, 2021).

Según estas estadísticas, se espera que el nivel de demanda aumente aún más en los años venideros, debido principalmente a la iniciativa global de diversos gobiernos para la creación de políticas regulatorias acerca de los “plásticos de un solo uso” (Herberz *et al.*, 2020), instituidas con el fin de crear una conciencia pública sobre la fuga de desechos para reducir la tasa de contaminación y a la vez combatir la crisis climática (Godfrey, 2019; Mari *et al.*, 2019). Debido a estos patrones de consumo impredecibles, una de las alternativas que se han tomado como forma de compensación a la demanda de plástico son los productos a base de pulpas lignocelulósicas (Kish, 2018; Małachowska *et al.*, 2020; Chauhan & Meena, 2021; Colín-Chávez *et al.*, 2021).

En relación a esto, existe una preocupación real acerca de llegar a superar la capacidad de regeneración de los recursos para la producción y manufactura de pulpa (Ghasemian *et al.*, 2012; Laftah & Rahaman, 2015; Vargas *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2018; Hájková *et al.*, 2023); situación que, producirá una mayor competencia por la obtención de materia prima y ocasionará un aumento en la disminución de la cubierta forestal por causa de talas indiscriminadas, que por consiguiente incrementará los costos de la madera (Omotoso & Owolabi, 2015; Otieno *et al.*, 2021). Sumado a esta inquietud, es de considerar también el hecho de que las especies maderables utilizadas comúnmente para la manufactura de pulpa dependen de largos ciclos de vida para cumplir con los periodos de cosecha establecidos, como ocurre con el eucalipto (Darmawan *et al.*, 2020). Por tanto, es de suma importancia incursionar en ampliar el rango de investigación para la industrialización de materias primas “no maderables”, que puedan desempeñarse como una alternativa más sostenible para resolver esta problemática (Saeed *et al.*, 2018; Jeetah *et al.*, 2021; Ferdous *et al.*, 2021; NagarajaGanesh *et al.*, 2023).

En el pasado, se han utilizado diferentes especies de fibras no maderables para el pulpado y fabricación de papel como, la piña (Laftah *et al.*, 2015), el agave (Jimenez-Muñoz *et al.*, 2016), el bagazo de caña (Samaraha & Khakifirooz, 2011; Rodríguez *et al.*, 2018), el kenaf (*Hibiscus cannabinus*) (Jonoobi *et al.*, 2011; Udohitinah & Oluwadare, 2011), la cebada (*Hordeum vulgare*) (Vargas *et al.*, 2015), el nopal (*Opuntia ficus-indica*) (Colín-Chavez *et al.*, 2021), el coco (*Cocos nucifera*) (Jeetah *et al.*, 2021), el cáñamo (*Cannabis sativa*) (Salem *et al.*, 2021), el banano (*Musa paradisiaca*) (Akpabio & Akpakpan, 2012; Khan *et al.*, 2014), el abacá (*Musa*

textilis) (Karlsson *et al.*, 2008; Moreno & Protacio, 2012; Mari *et al.*, 2019; Darmawan *et al.*, 2020; Saragih *et al.*, 2020), entre otros.

Aunque es de notar, que este interés por expandir la base de materia prima disponible no se debe únicamente al déficit actual expuesto, sino también, a que dentro de este grupo de recursos lignocelulósicos destaca la ventaja de que los cultivos poseen ciclos de vida más cortos y una rápida capacidad de regeneración, así como un precio en comparación relativamente menor (Laftah *et al.*, 2015; Abd El-Sayed *et al.*, 2020); cualidades que, presentan un gran reconocimiento en el ámbito industrial. Asimismo, muchas especies se caracterizan por poseer un alto módulo de tracción y bajo alargamiento a la rotura; por lo que se ha documentado, que la pulpa proveniente de las mismas, presentan una mayor aptitud de pulpeo y mejores calidades de material blanqueado para ciertos tipos de papel especializados (Abd El-Sayed *et al.*, 2020).

A pesar de estas cualidades, se ha documentado que únicamente alrededor del 8% del total del papel y cartón producido a nivel mundial proviene de este tipo de materiales fibrosos, entre los cuales se encuentran los desechos agrícolas (Khan *et al.*, 2014; Otieno *et al.*, 2021). Por lo cual, destaca el hecho de que el nivel de información científica recopilada hasta el momento en este campo es mínimo; considerando que muy pocos estudios se enfocan en la importancia de la fibra madre sobre la calidad del producto final (propiedades físico-mecánicas) (Benitez *et al.*, 2021). Aspectos como la morfología y la composición química que, se derivan a su vez, de variables como la ubicación geográfica, el tiempo de cosecha y las condiciones genotípicas de la planta (Valverde *et al.*, 2022); así como del posterior método de pulpado y formación del papel (Benitez *et al.*, 2021) tienen incidencia en la calidad y grado final del producto.

Fibras como la especie *Musa textilis* se han destacado por ser capaces de remplazar a las fibras de tipo maderable para la fabricación de pulpa y papel (Karlsson *et al.*, 2008; Araya-Gutiérrez *et al.*, 2023); así como por distinguirse, al cumplir con características químicas específicas buscadas en la industria (Bajpai, 2018), tales como poseer un porcentaje de lignina relativamente bajo de entre 5-13% y un contenido de celulosa de entre 56-68% (Richter *et al.*, 2013; Saragih *et al.*, 2020). A su vez, se destaca el tipo de microfibrillas que poseen, ya que se caracterizan por tener valores de resistencia a la tracción de hasta 600 MPa y un módulo de elasticidad longitudinal de hasta 50 GPa (Saragih *et al.*, 2018).

En relación a esto, destaca el hecho de que en países con cultivos de *M. textilis* en fase piloto como lo es el caso de Costa Rica, no se tiene una noción clara de las características básicas de los grados y calidades de la fibra proveniente de los diversos cultivares existentes; por lo cual, existe un vacío de información importante que podría aprovecharse desde el punto de vista comercial para potenciar y dar un valor agregado específico al producto cosechado actualmente y a sus respectivos residuos. Es de considerar, que con estos conocimientos se lograría dar un impulso hacia la optimización de la eficiencia de los recursos, y así contribuir hacia la cultura de la bioeconomía circular (Salem *et al.*, 2021; Jayaprakash *et al.*, 2022). Por tanto, el objetivo de este estudio fue caracterizar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de prototipos de papel elaborados a partir de la fibra de *Musa textilis* Née proveniente de cinco genotipos de calidad comercial cultivados en la región Caribe de Costa Rica.

Metodología

Procedencia y selección de materia prima

La materia prima utilizada en la fabricación de los prototipos de papel corresponde a cinco genotipos de fibra virgen de *M. textilis* (IB16, IA17, IR18, GP31 y SP32), caracterizados por su calidad comercial según el estándar nacional de venta.

Los genotipos IB16, IA17 y IR18 corresponden a fibra cosechada de una plantación piloto perteneciente al Instituto de Transferencia Agropecuaria de Costa Rica (INTA) ubicada en Guápiles, Limón, Costa Rica (10°15'N, 83°46'W). El sitio presenta una temperatura media anual de 22,2 °C y una precipitación media anual de 3362 mm (Climate-Data, 2019a); con suelos del orden Inceptisol (Ortiz & Soto, 2014) y un pH medio de 5,5. Mientras que los genotipos GP31 y SP32 corresponden a plantaciones comerciales ubicadas en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23' N, 83°56' W). Dicha ubicación, se caracteriza por presentar una precipitación media anual de 2996 mm y una temperatura media anual de 22 °C (Climate-Data, 2019b); con suelos identificados dentro del orden Ultisol (Ortiz *et al.*, 2014), con un pH ácido promedio menor a 5,5 y una saturación de acidez del 40%.

De cada genotipo, se colectaron tallos de un total de cinco plantas maduras, para la obtención

de la fibra. A dichos tallos, se les aplicó la técnica de desfibración descrita por Gölthenboth & Mühlbauer (2010). Se seleccionó exclusivamente la fibra que entrara en la categoría de primera calidad establecida según el estándar nacional de calidad comercial para la especie.

Proceso de deslignificación

Inicialmente, la fibra se sometió a un proceso de secado a una temperatura de 70 °C por un periodo de 72 h, hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 12%. Posteriormente, se dimensionó las hebras a un tamaño medio de 20 ± 2 mm de longitud. El material dimensionado fue pulpado con el método a la soda (NaOH al 18%, p/p) a temperatura una temperatura de 120 ± 5 °C durante 3 h. Una vez finalizada la cocción, se procedió a drenar el licor negro y enjuagar la pulpa residual, cribándola manualmente con un tamiz de malla de 1 mm²; y seguidamente, se incubó el material durante 12 h en agua a temperatura ambiente con el fin de eliminar las fracciones solubles residuales de álcali y neutralizar la solución. Posteriormente, se procedió a aplicar un proceso de refinado parcial, en donde se desintegró el material con una licuadora industrial durante 3 min a velocidad alta; para luego, cribar de nuevo el material. Finalmente, la materia prima refinada se cribó de nuevo y se determinó el rendimiento de la pulpa por peso.

Caracterización química de la pulpa

El análisis de la composición química de las pulpas lignocelulósicas se realizó por triplicado e incluyó la cuantificación del contenido de lignina, holocelulosa, cenizas y extractivos; de acuerdo con lo descrito en las normas estandarizadas TAPPI y ASTM.

De esta manera, el contenido de lignina se determinó mediante la aplicación del método gravimétrico según la norma TAPPI T222 om-02 (2002), posterior a la eliminación de extractivos según lo descrito en la norma TAPPI T204 cm-97 (2007). El contenido de holocelulosa se midió siguiendo el método Wise *et al.* (1946). Los solubles de NaOH al 1% se determinaron con la norma TAPPI T212 om-18 (2018); así como, los solubles en agua fría y caliente según TAPPI T207 cm-07 (2007). Asimismo, los solubles en etanol-tolueno y diclorometano se evaluaron según ASTM D1107-21 (2021) y ASTM D1108-21 (2021), respectivamente.

Formación de las láminas

La conformación de las láminas de papel se realizó siguiendo los parámetros descritos en la norma TAPPI T205 sp-02 (2006) modificada. Para lo cual, se procedió a aplicar el proceso de moldeado de las láminas utilizando un formador de madera con malla N° 60 y dimensiones de 22 x 28 cm (tamaño carta estándar para papel), correspondiendo a una suspensión del material en una relación 1:30 (p/v). Posteriormente, se aplicó el proceso de prensado del lote de láminas en una prensa hidráulica con capacidad de carga de 8000 kg; aplicando una fuerza de 13 kg cm⁻² durante 1 h a temperatura ambiente; con el fin, de completar la extracción del agua residual y proporcionar uniformidad a las láminas. Finalmente, el secado de las láminas se realizó en una habitación con ambiente controlado a 25 ± 1 °C por un periodo de 24 h. Para este estudio, se empleó un gramaje estándar de 100 g m⁻² para todo el conjunto de muestras a caracterizar.

Caracterización de las láminas

Previo a la ejecución de la caracterización planteada, se acondicionaron las láminas durante 48 h a una temperatura de 23 ± 1 °C y una humedad relativa de 50 ± 2% en una habitación con condiciones ambientales controladas, según lo descrito en la norma TAPPI T402 sp-08 (2013).

Propiedades físicas

Las propiedades físicas básicas de las láminas de papel se analizaron por triplicado. Se determinó el peso básico y gramaje de las láminas según la norma T410 om-08 (2013), el contenido de humedad según TAPPI T412 om-22 (2022) y la densidad aparente mediante el cálculo de la relación peso/volumen (volumen calculado a partir del espesor * área de lámina). Asimismo, se evaluó el color mediante el testeo de las muestras por ambas caras por genotipo, con el sistema de cromatografía estandarizada DigiEye de VeriVide, en formato CIELab, generando tres parámetros para explicar el color que consistieron en: L* (luminosidad), a* (tendencia de color de rojo a verde) y b* (tendencia de color de amarillo a azul). Dichos parámetros se utilizaron para calcular el cambio de color $\Delta(E^*)$ (Ec. 1) utilizando como referencia un papel de *M. textilis* obtenido a nivel industrial (empresa en el extranjero). Este

parámetro se definió según la clasificación de Hikita *et al.* (2001) de los papeles fabricados, bajo la siguiente ecuación:

$$\Delta(E^*) = \sqrt{[\Delta(L^*)]^2 + [\Delta(a^*)]^2 + [\Delta(b^*)]^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde $\Delta(E^*)$ representa la diferencia en color, $\Delta(L^*) = L_{comercial}^* - L_{genotipo}^*$, $\Delta(a^*) = a_{comercial}^* - a_{genotipo}^*$ y $\Delta(b^*) = b_{comercial}^* - b_{genotipo}^*$.

Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de las láminas se centró principalmente en la prueba de tensión, en donde se evaluaron las propiedades: resistencia a la tensión, longitud de rotura, tensión de rotura e índice de tensión; según lo descrito en la norma TAPPI T494 om-01 (Muchorski, 2006). Se fallaron un total de 14 probetas en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen H10KT (Tinius Olsen TMC, Pasadena, CA, USA). Asimismo, se evaluó la propiedad de resistencia al deformado con la prueba de aplastamiento por anillo (*Ring Crush Test*) descrita en la norma TAPPI T822 om-02 (2007); la permeabilidad al aire con el método de Gurley según la norma TAPPI T460 om-02 (2006) y la propiedad de resistencia a la compresión con el *Stiffnes Test* (STDI) según TAPPI T826 om-08 (2013). Para estos análisis, se fallaron un total de tres réplicas.

Propiedades energéticas

Se evaluó la estabilidad térmica de las muestras mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA) siguiendo la metodología propuesta por Sebio-Puñal *et al.* (2012), en un equipo modelo SDT Q600 (TA Instruments, New Castle, DE, EE. UU.). Las muestras se programaron para un barrido en una rampa de calentamiento de 20 a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C mm⁻¹, en una atmósfera inerte de nitrógeno constante de 100 ml min⁻¹. Asimismo, se testeó el poder calórico de las muestras con la prueba ASTM D5865/D5865M-19 (2019) y el contenido de cenizas con TAPPI T211 om-02 (2007). Los análisis descritos se evaluaron por triplicado.

Diferencia entre prototipos y uso potencial

La diferenciación entre prototipos de papel se identificó mediante la aplicación de un análisis

multivariante para identificar la similitud entre prototipos y determinar las propiedades que generan esa distinción.

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio con análisis de varianza. Previo a ello, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y homocedasticidad de las varianzas con las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. Posteriormente, se realizó un el ANOVA para cada parámetro analizado con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las pulpas fabricadas; y en caso de ser necesario se aplicó la prueba de Tukey para identificar diferencias entre medias. Los análisis derivados del ANOVA se ejecutaron en el software Infostat v. 2020e (Di Rienzo *et al.*, 2020). Finalmente, se aplicó un análisis multivariante con el paquete FactoMineR v. 2.4., utilizando el programa R v. 4.2.1. (Makosso-Kallyth & Diday, 2022). Todos los análisis se realizaron con una significancia de 0,05.

Resultados y Discusión

Las diferentes pulpas celulósicas obtenidas a partir de los cinco genotipos testeados fueron utilizadas para la fabricación de prototipos de papel, y los materiales resultantes se analizaron en laboratorio como se describe a continuación.

Propiedades químicas de la pulpa

Los valores medios obtenidos en la caracterización química de las pulpas se representan en la tabla 4. La holocelulosa se denomina como la fracción total de polisacáridos presentes en los materiales lignocelulósicos, y comprende los contenidos de celulosa y hemicelulosas (Rosales-Castro *et al.*, 2016). Para este estudio, se demostró que únicamente IB16 y IR18 mostraron diferencias significativas, con contenidos de 98,52% y 93,27%, respectivamente; destacando que todas las pulpas presentaron valores superiores al 90%.

La lignina se relaciona a los compuestos orgánicos residuales que resultan ser resistentes en su mayoría a los procesos microbiológicos y químicos; por lo cual, en la industria papelera se considera como un elemento indeseable (Rosales-Castro *et al.*, 2016), ya que provoca que el papel se vuelva quebradizo y permite que se formen subproductos al oxidarse

fotoquímicamente, lo cual corresponde a un amarillamiento y dificultad de blanqueamiento (Chauhan *et al.*, 2021). Asimismo, existe una relación directamente proporcional entre este contenido y la cantidad de productos químicos necesarios para un pulpado exitoso (Moreno *et al.*, 2012; Abd El-Sayed *et al.*, 2020). Respecto a este parámetro, IR18 mostró el contenido más alto de lignina (6,31%) y diferencias significativas con las demás pulpas; que presentaron un contenido promedio dentro del rango de los 2,46-3,74%.

Con relación a los valores obtenidos, NagarajaGanesh *et al.* (2023) describen que las fibras celulósicas con contenidos superiores al 33% de holocelulosa e inferiores al 30% de lignina, son consideradas prometedoras para funcionar como materia prima en la producción de papeles con propiedades deseables. Para este estudio, las fibras utilizadas se destacaron por presentar contenidos promedio superiores al 80% de holocelulosa e inferiores al 16% de lignina en todos los casos (Valverde *et al.*, 2022); valores que aumentaron y disminuyeron respectivamente al realizar la deslignificación. Lo anterior, concuerda con lo descrito por Małachowska *et al.* (2020) en pulpa de pino (*Pinus sylvestris*) con el método del sulfato, Jonoobi *et al.* (2011) en pulpa de kenaf (*Hibiscus cannabinus*) con el método a la soda y Vargas *et al.* (2015) en con pulpa de cebada (*Hordeum vulgare*) bajo el método de despulpado a la soda-AQ; en los que explican que normalmente por efecto del tratamiento químico (influencia de la cocción de la fibra con el álcali), el contenido de holocelulosa de las fibras posterior a la aplicación del pulpado incremento entre 33% y 37%; mientras que la lignina disminuyó entre un 6% y 8%.

En comparación con los resultados obtenidos, Moreno & Potracio (2012) obtuvieron en pulpa de *M. textilis* cv. Inosa bajo el método a la soda, contenidos de holocelulosa de entre 93,88-95,09% y lignina de entre 6,11-7,71%; con lo cual, se demuestra que los genotipos analizados superan las expectativas de calidad para una de las variedades comercialmente conocidas para pulpado industrial. Es de destacar, que se ha reportado que esta especie, ha presentado un proceso de deslignificación más efectivo en comparación con varias especies maderables (Mari *et al.*, 2019), entre las cuales, destaca el eucalipto (*Eucalyptus pellita*) (Darmawan *et al.*, 2020). Valores similares a los obtenidos en este estudio, fueron encontrados en pulpa de cebada (*H. vulgare*) para holocelulosa (91,9%) y lignina (2,9%) (Vargas *et al.*, 2015); así como en pulpa de bambú (*Bambusa vulgaris*) (2,68%) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) ($2,4 \pm 0,3\%$) solo para

lignina con los métodos de pulpeo kraft y a la soda, respectivamente (Akeem Azeez *et al.*, 2016; Colin-Chavez *et al.*, 2021). Por otra parte, los valores obtenidos de lignina en las pulpas (a excepción de IR18) se consideran inferiores a los obtenidos en especies maderables como algunas variedades de pino entre las cuales destaca el *P. sylvestris* (4,4%) y *P. contorta* (4,5%) (Sable *et al.*, 2012); así como en melina (*G. arborea*) (6,41%) (Akeem Azeez *et al.*, 2016).

Los contenidos referentes a los extraíbles influyen en el proceso productivo del papel, ya que determinan el grado de degradación de la celulosa ante la aplicación de un proceso de deslignificación y pulpado (Akeem Azeez *et al.*, 2016); por lo que dependiendo de la facilidad con la que se diluya, así será la necesidad de intensificar el pulpado (Chauhan *et al.*, 2021). Asimismo, se ha reportado que estos compuestos alifáticos causan problemas de brea en la planta de producción, y reducen el rendimiento y la capacidad de blanqueamiento (Neiva *et al.*, 2015).

En cuanto a esta caracterización, en primer lugar, la pulpa IR18 presentó los contenidos más altos de solubles en diclorometano y agua fría, mientras que IB16 destacó por ser el que mostró los valores más bajos tanto en estas variables, como en agua caliente (15,94%). En términos generales, los solubles en agua se asocian a los diferentes compuestos de carácter inorgánico como gomas, taninos, azúcares y almidones (Colin-Chavez *et al.*, 2021; Megra *et al.*, 2022). En este caso, los resultados obtenidos en agua fría fueron en todos los casos superiores a los obtenidos en agua caliente; a pesar de que es esperable el caso contrario. Hájková *et al.* (2023) explican que esto pudo deberse a la presencia de carbohidratos de bajo peso molecular, polifenoles y colorantes que se transfieren más fácilmente a temperaturas altas y a una posible alta cantidad de almidón insoluble en agua fría que fue parcialmente disuelta.

Asimismo, respecto a los solubles en etanol-tolueno, se tiene que las pulpas GP31 y SP32 presentaron diferencias significativas entre sí; así como los contenidos más altos (1,59 y 2,19%, respectivamente), destacando que las demás pulpas mostraron contenidos inferiores al 1%. Según Megra *et al.* (2022), estos solubles determinan el contenido de sustancias relacionadas a resinas, esteroides vegetales, hidrocarburos no volátiles, heparina de bajo peso molecular, sales y otras sustancias hidrosolubles. Finalmente, IA17 presentó el contenido más bajo de NaOH (6,87%), y se diferenció significativamente únicamente con IB16; que tuvo valores muy

similares a las demás pulpas (8,54% promedio). Esta solubilidad determina la resistencia de las pulpas bajo una solución de álcali diluido, así como el grado de descomposición del material por hongos (Jahan *et al.*, 2007; Moreno *et al.*, 2012).

Tabla 4. Composición química y contenido de extractivos de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Componente	IB16	IA17	IR18	GP31	SP32	
Holocelulosa (%)	98,52 ^B	96,99 ^{AB}	93,27 ^A	94,66 ^{AB}	95,29 ^{AB}	
	(1,54)	(2,35)	(0,64)	(1,59)	(0,64)	
Lignina (%)	2,46 ^A	3,74 ^C	6,31 ^D	2,90 ^{AB}	3,09 ^B	
	(0,14)	(0,08)	(0,15)	(0,23)	(0,19)	
Extractivos (%)	Diclorometano	2,01 ^A	3,71 ^B	4,61 ^D	4,16 ^C	2,16 ^A
		(0,04)	(0,20)	(0,11)	(0,16)	(0,11)
	Agua caliente	6,80 ^A	7,12 ^{AB}	7,97 ^C	7,74 ^{BC}	7,47 ^{BC}
		(0,09)	(0,22)	(0,30)	(0,26)	(0,25)
	Agua fría	15,94 ^A	19,96 ^B	18,33 ^{AB}	19,93 ^B	16,81 ^A
		(0,35)	(1,36)	(1,22)	(0,53)	(0,70)
Etanol-tolueno	0,81 ^B	0,70 ^{AB}	0,44 ^A	1,58 ^C	2,19 ^D	
	(0,08)	(0,03)	(0,02)	(0,07)	(0,19)	
NaOH al 1%	8,55 ^B	6,87 ^A	8,43 ^{AB}	8,64 ^B	8,52 ^{AB}	
	(0,77)	(0,66)	(0,96)	(0,36)	(0,30)	

Nota: Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar correspondiente con un n=3. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05.

Los resultados obtenidos demuestran que los genotipos muestreados presentan una buena disposición para la producción de papel con calidades deseables por la industria. Es de tener en cuenta que la aptitud de estas pulpas, considerando las mejores características de las fibras, según la ubicación geográfica, el tiempo de cosecha y las condiciones genotípicas singulares de cada planta (Abd El-Sayed *et al.*, 2020; Valverde *et al.*, 2022).

Propiedades físicas

En la tabla 5 se presentan las propiedades físicas evaluadas para cada prototipo de papel. A nivel general el papel como material, es considerado altamente higroscópico y su calidad se define en gran parte por este parámetro, ya que afecta directamente las propiedades físicas. En términos de industria, un papel de calidad aceptable presenta contenidos de humedad promedio de entre los 5-8% (varía según el tipo de fibra y la humedad ambiental) (Zanuttini, 2008). En este estudio todos los prototipos cumplieron con esta condición a excepción de IR18; específicamente, IB16 y SP32 no presentaron diferencias significativas (6,70 y 7,15 %) y junto con IA17 (6,03%) presentaron los menores valores; ya que las demás pulpas estuvieron por encima del 7,50%. Los valores obtenidos, fueron significativamente menores a los encontrados en prototipos de papel elaboradas bajo el método de pulpado a la soda, a partir de banano (*Musa paradisiaca*) (10,8%), melina (*G. arborea*) (10,6%) y pino (*Pinus caribaea*) (10,2%) (Akpabio *et al.*, 2012).

Se demostraron diferencias significativas para dos grupos, tanto en la variable rendimiento de la pulpa como en gramaje. El primer grupo conformado por IB16, IR18 y SP32, y el segundo por IA17 y GP31; aunque como se puede denotar para la variable rendimiento, los valores obtenidos fueron muy cercanos y las diferencias estadísticas presentadas fueron mínimas, ya que los valores estuvieron en un rango de los 59,73-62,65%. Akeem Azeez *et al.* (2016) destacan que la variable rendimiento está directamente relacionada con la composición química de la fibra madre. Lo cual concuerda con lo descrito por Nagarajabesh *et al.* (2023) y Ferdous *et al.* (2021); entonces se puede afirmar que los altos contenidos de holocelulosa pudieron influir en los elevados valores obtenidos en este parámetro (Tabla 4). Valores similares fueron encontrados para la especie *M. textilis* por Darmawan *et al.* (2020) con rendimientos de 52,54%, Mari *et al.* (2019) con 62,53% (método a la soda) y por Moreno *et al.* (2012) en las variedades Inosa, Laylay y Lanawaan, con valores de 65,79%, 62,38% y 61,77%, respectivamente. Asimismo, se encontró que estos rendimientos superaron al de pulpas de fibras no maderables como el banano (*M. paradisiaca*) con 48,61% (método a la soda) (Khan *et al.*, 2014), nopal (*O. ficus-punctata*) con 43,1 y 45% (Mannai *et al.*, 2017; Colin-Chavez *et al.*, 2021) y cebada (*H. vulgare*) con 47,7% (Vargas *et al.*, 2015). Así como en las especies maderables *E. camaldulensis* con 45,90% y melina (*G. arborea*) con 52,48% (Akeem Azeez *et al.*, 2016). Así como en en

otras especies como *E. grandis* (45,6%), *E. saligna* (44,6%), *E. globulus* (49,8%); *P. sylvestris* (45,9%) y *P. contorta* (48,9%); bajo pulpado kraft (Neiva *et al.*, 2015; Sable *et al.*, 2012).

La densidad aparente, se considera una medida del nivel de empaquetamiento de las fibras en el compuesto y la organización estructural de la red de filamentos (Neiva *et al.*, 2015). Entonces, valores altos normalmente se relacionan a una mejor unión y conformidad entre filamentos o área adherida del papel (Omotoso *et al.*, 2012). En este caso, la pulpa que presentó mayor densidad fue GP31 con un valor medio de 572,53 kg m⁻³, diferenciándose estadísticamente de las demás pulpas; y que a su vez fue la que presentó el mayor gramaje (108,06 g cm⁻²). Las densidades medias más bajas (IR18 y SP32), se pueden explicar debido a un posible hinchamiento inadecuado de las fibras debido a un refinado ineficiente; ya que como explican Jeetah *et al.* (2021) a mayor procesamiento mejor será la unión entre fibras. Valores similares a los obtenidos fueron encontrados en prototipos de papel elaborado a partir de bambú (*B. vulgaris*) con el método kraft (Khantayanuwong *et al.*, 2023).

Tabla 5. Propiedades físicas de prototipos de papel elaborados a partir de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Tipo de Pulpa	Rendimiento (%)	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg m ⁻³)	Gramaje (g cm ⁻²)
IB16	59,95 ^A (0,75)	6,70 ^B (0,09)	516,93 ^B (4,37)	99,55 ^A (0,79)
IA17	61,77 ^B (0,98)	6,03 ^A (0,31)	523,42 ^B (3,62)	105,64 ^B (0,61)
IR18	59,73 ^A (0,58)	7,83 ^C (0,13)	480,99 ^A (0,91)	97,12 ^A (2,60)
GP31	62,65 ^B (1,48)	9,29 ^D (0,25)	572,53 ^C (12,31)	108,06 ^B (2,34)
SP32	62,12 ^B (1,47)	7,15 ^B (0,10)	484,11 ^A (8,65)	100,50 ^A (2,15)

Nota: Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar correspondiente con un n=3. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05.

En cuanto al análisis del color con el sistema CIELab (Tabla 6), se denota que para el parámetro luminosidad (L^*) se presentaron diferencias significativas entre todos los genotipos. Dicha variable explica cuan claro (valores cercanos a 100) u oscuro (valores cercanos a 0) es un material. Según esto, se tiene que la pulpa GP31 demostró el menor valor de a^* y el mayor de b^* (3,90 y 16,16, respectivamente); lo que resulta en una saturación del color (C^*) de 16,63 y una luminosidad más alta (80,79), correspondiendo a un papel más oscuro, amarillento y rosáceo. Respecto al cambio de color, se demostró que todos los tratamientos presentaron diferencias significativas; destacando una vez más que GP31 fue la pulpa que presentó el ΔE^* más bajo (0,84), mientras que SP32 en contraste tuvo un cambio de 14,05; lo cual, indica que fue la más susceptible al proceso de deslignificación químico aplicado.

Respecto a este cambio de color, se puede denotar que las pulpas que presentaron cambios más significativos según los parámetros establecidos por Hikita *et al.* (2001) fueron a su vez, las únicas que mostraron una disminución en la variable luminosidad al aplicar la deslignificación; lo cual explica el porqué de la coloración más oscura de estos prototipos. Según esto, las reducciones del parámetro luminosidad fueron de 10,81% (IR18) a 15,28% (SP32); mientras que en las demás pulpas el valor aumento entre 0,61% a 3,18% (Valverde *et al.*, 2022). Con relación a esto, es de destacar que esta coloración normalmente se atribuye a una oxidación de la lignina que permite que el material aumente su tonalidad oscura y disminuya su nivel de brillo (NagarajaGanesh *et al.*, 2023).

A nivel de industria, las pulpas vírgenes caracterizadas por presentar una tendencia más blanquecina y uniforme (menor concentración de lignina) (Pereira *et al.*, 2011), tienen un mayor valor en el mercado debido a que estas presentan una menor pérdida de rendimiento a la hora de aplicar procesos de blanqueamiento posteriores (Hirondo *et al.*, 2020; Sahu & Gupta, 2020), ya que la posibilidad de destrucción de las fibras disminuye al reducir la intensidad de blanqueamiento relacionada con la cantidad de químicos aplicada y mecanización al material (Bajpaj, 2018; Małachowska *et al.*, 2020).

Tabla 6. Parámetros de color de prototipos de papel elaborado a partir de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Tipo de pulpa	L^*	a^*	b^*	C^*	$\Delta(E^*)$
IB16	78,37 ^D (0,18)	4,54 ^B (0,17)	14,92 ^B (0,13)	15,60 ^B (0,12)	2,22 ^B (0,19)
IA17	76,75 ^C (0,18)	7,10 ^D (0,29)	12,52 ^A (0,22)	14,39 ^A (0,20)	5,90 ^C (0,15)
IR18	69,48 ^B (0,04)	6,42 ^C (0,11)	13,04 ^A (0,20)	14,54 ^A (0,23)	11,33 ^D (0,07)
GP31	80,79 ^E (0,30)	3,90 ^A (0,33)	16,16 ^C (0,37)	16,63 ^C (0,36)	0,84 ^A (0,30)
SP32	66,28 ^A (0,35)	6,60 ^{CD} (0,13)	16,04 ^C (0,19)	17,34 ^D (0,20)	14,05 ^E (0,35)

Nota: Sistema utilizado CIELab. Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar correspondiente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05.

Propiedades mecánicas

En la figura 11a, los resultados en la variable resistencia a la tensión mostraron que la pulpa IR18 exhibió los menores valores ($2,63 \text{ kN m}^{-1}$), mientras que la pulpa GP31 mostró los mayores valores ($4,51 \text{ kN m}^{-1}$); ambas diferenciándose significativamente entre sí y de las demás pulpas. Estos valores son comparables a los obtenidos por, Udohitinah *et al.* (2011) en pulpa de kenaf blanqueada (*H. cannabinus*) con el método kraft, que destacan por estar en el rango de los $3,30$ - $4,80 \text{ kN m}^{-1}$. Asimismo, para papeles con gramajes que pueden ser tomados como referencia (papel kraft/papel bolsero, 100 g m^{-2}) presentan valores similares ($4,4 \text{ kN m}^{-1}$) (Zanuttini, 2008).

Respecto a las variables longitud de rotura (Figura 11b) e índice de tensión (Figura 11c), en ambos casos se presentó el mismo comportamiento estadístico; en donde, IA17 obtuvo los mayores valores para ambas variables ($3118,5 \text{ m}$ y $30,57 \text{ Nm g}^{-1}$). La longitud de rotura es tratada como una medida de resistencia directa a la tensión en condiciones específicas de velocidad de extensión; en donde, entre más alto sea el valor reportado mejor será la calidad del

papel, ya que esta es la longitud en la cual el papel se rompe bajo su propio peso (Ghasemian *et al.*, 2012). En este caso, las pulpas IR18 y SP32 se comparan con valores reportados para pulpas de nopal (*O. ficus-indica*) (1,57 km) (Mannai *et al.*, 2017), mientras que IB16 tuvo resultados similares a los obtenidos en pulpa de paja de arroz (*Oryza sp*) (2,7 km) (Colin-Chavez *et al.*, 2021). A su vez, IA17 y GP31 son comparables con los resultados obtenidos en papel corrugado de bagazo de caña (*Saccharum officinarum*) (2,96 km) con pulpado NSSC (Samaraha *et al.*, 2011). A nivel general, las pulpas tuvieron valores inferiores a los reportados en algunas variedades comerciales de *M. textilis* (> 5,0 km) (Moreno *et al.*, 2012), así como en especies maderables como pino (3,4 km en *P. silvestris* y 3,5 km en *P. contorta*) (Sable *et al.*, 2012).

Respecto al índice de tensión (Figura 11c), Colin-Chavez *et al.* (2021) destacan que este factor está directamente relacionado con las variables de la fibra madre utilizada (longitud, resistencia y capacidad de unión) y generalmente se muestra superior en pulpas provenientes de especies maderables e inferior en pulpas no maderables. Aunque es de destacar que este parámetro es independiente de las características químicas de la fibra según los autores Ghasemian *et al.* (2012). De acuerdo con esto, los índices obtenidos fueron bajos en comparación con el de las pulpas maderables de melina (*G. arborea*) (34,5 Nm g⁻¹) (Akpabio *et al.*, 2012), *Melia azedarach* (23,3 Nm g⁻¹) con el método de sulfuro (Megra *et al.*, 2022), pino (*P. silvestris* y *P. contorta*) (33,5 y 34,3 Nm g⁻¹) con el método kraft (Sable *et al.*, 2012). Sin embargo, se encuentra en el mismo rango de pulpa derivada de fibras no leñosas como bagazo de caña (*S. officinarum*) (29,69 Nm g⁻¹) (Samaraha *et al.*, 2011) y bambú (*B. vulgaris*) (30,0 Nm g⁻¹) (Akeem Azeem *et al.*, 2016).

En la variable tensión de rotura (Figura 11d), los valores variaron entre 3,61-3,79% para las pulpas IB16, IA17 y GP31; diferenciándose estadísticamente de resto, que se encuentran en el rango de los 2,29-2,61%. Esta medida refleja la dureza del papel a partir de la capacidad de las láminas a resistir una tensión de tracción no uniforme y adaptarse a un contorno deseado sin romperse (Ghasemian *et al.*, 2012; Colin-Chavez *et al.*, 2021). Los valores encontrados son similares a los estudios realizados por Udohitinah *et al.* (2011) en pulpa de kenaf (*H. cannabinus*) blanqueada y batida (3,74%) para el primer grupo de prototipos de este estudio y sin blanquear ni batir para el segundo grupo (1,53-2,75%); así como pulpa de maíz (3,42%) con

el método a la soda (Hájková *et al.*, 2023). Asimismo, en todos los casos, se superó a los valores reportados en las pulpas de tipo maderable de melina (*G. arborea*) (0,48%) y variedades de pino como *P. caribaea* (2,2%) (Akpabio *et al.*, 2012), *P. sylvestris* (1,1%) y *P. contorta* (1,5%) (Sable *et al.*, 2012).

Relacionado a la caracterización mecánica realizada en este estudio, Khan *et al.* (2014) sugieren que las variables resistencia a la tensión y la densidad están altamente correlacionadas en una relación prácticamente lineal, en donde una mayor densificación resulta en una mayor posibilidad de contacto y unión; lo cual, es concordante con los resultados obtenidos en el presente estudio (Tabla 5), en donde los bajos valores obtenidos en densidad en relación con el gramaje esperado, tuvieron que ver con los resultados de las propiedades mecánicas de la pulpa. Con relación a esto, factores como la aplicación de una fase de batido o refinación contribuyeron a esta situación; ya que este proceso afecta directamente la uniformidad del papel y a sus valores de resistencia según la intensidad en que se aplique (Samaraha *et al.*, 2011; Akeem Azeez *et al.*, 2016; Darmawan *et al.*, 2020).

A su vez, se deben considerar aspectos como el grosor de las paredes celulares (Ghasemian *et al.*, 2012); ya que fibras con paredes gruesas como la especie utilizada (*M. textilis*) que a su vez tienden a ser más rizadas y menos flexibles que las fibras de madera suave (Karlsson *et al.*, 2008), tienden a formar una condición de fibrilación interna resistente. Lo cual, implica que se requiera de una mayor energía de batido para crear una unión de fibras aceptable (Khanayanuwong *et al.*, 2023), lo que en algunos casos provoca la posibilidad de que estos filamentos se acorten (Ghasemian *et al.*, 2012) y se reduzca la flexibilidad de los estos (Salem *et al.*, 2021).

Entonces, por lo general pulpas no batidas bajo estas condiciones morfológicas, tienden a contribuir a la formación de papeles más voluminosos con baja resistencia a la tracción, estallido y plegado (Saeed *et al.*, 2018; Ferdous *et al.*, 2021); ya que existe una predisposición a un material más débil derivado de los enlaces débiles entre filamentos creados por la baja tasa de colapsabilidad de las paredes (Omotoso *et al.*, 2015). Considerando que en este estudio el proceso de batido aplicado a las pulpas fue mínimo y a nivel artesanal, es de esperarse que estos valores sean bajos al compararse con datos reportados para la especie a nivel industrial.

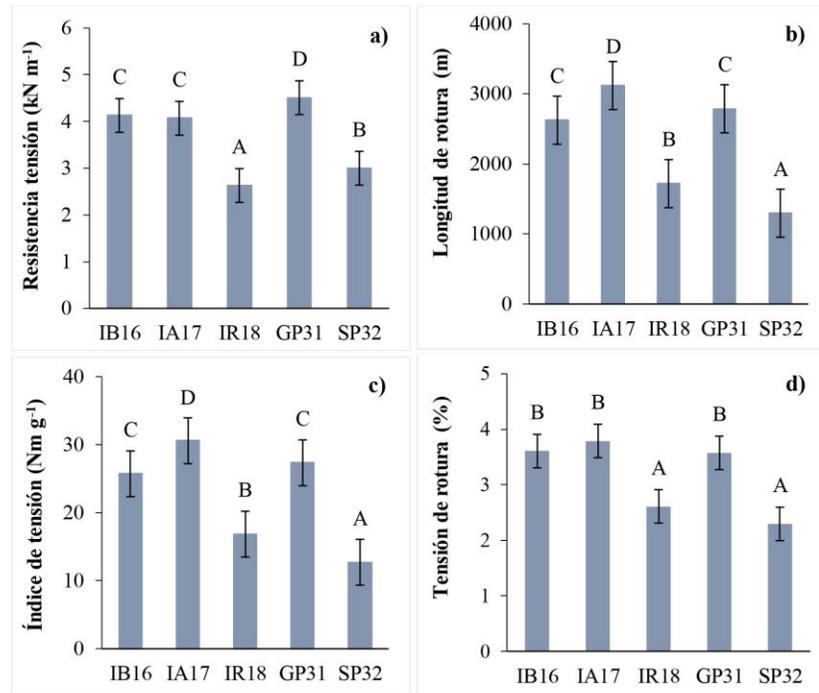


Figura 11. Propiedades (a) resistencia a la tensión, (b) longitud de rotura, (c) índice de desgarro longitudinal y (d) tensión de rotura para prototipos de papel elaborados con pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Ring Crush (RC) es una prueba mecánica de compresión que se utiliza para evaluar la resistencia del papel y la pulpa. Diversos autores reportan que la resistencia del papel aumenta con el aumento de la densidad de la pulpa, independientemente del tipo de pulpa utilizada (Darmawan *et al.*, 2020); lo cual tiene sentido, ya que GP31 se destacó por presentar valores superiores de 535,74 kg m⁻¹, diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos (< 360 kg m⁻¹) y fue la que mostró una de las densidades más altas. Estos valores superan con creces a los obtenidos en pulpa de bagazo de caña (*S. officinarum*) (127,47 kg m⁻¹) (Samaraha *et al.*, 2011).

Por otra parte, STDI demuestra la resistencia del papel a la compresión en el plano Y en un punto específico. IR18 y IA17 son los que más se acercan a las especificaciones estándar para papel tipo Liner junto con SP32 ($2,30 \text{ kN m}^{-1}$), a pesar de que los valores son mucho más bajos. Se encontraron resultados similares a los de las IB16, IA17 e IR18 en el estudio realizado por Mannai *et al.* (2017) en pulpa de agave (*O. ficus-indica*) con valores de $1,34 \text{ kN m}^{-1}$.

La permeabilidad al aire, puede utilizarse como un indicador indirecto de la eficiencia de la filtración de líquidos y gases en el material; y es influenciada por la estructura interna que es conformada por la calidad de las fibras (Moreno *et al.*, 2012), hablándose específicamente del tipo, longitud, grado de hidratación, orientación y compactación de las estas en la lámina (Colin-Chavez *et al.*, 2021). A su vez, esta propiedad es considerada como un indicador de la capacidad del papel para usos relacionados a la impresión y escritura (Zanuttini, 2008). En el presente estudio, se demostró que las pulpas IB16, IR18 y SP32 no presentaron diferencias significativas entre sí y se destacaron por presentar valores menores a 1 s; en contraste con IA17 que presentó un valor promedio de 10,20 s. Valores similares a estos, fueron encontrados en papel reciclado tipo liner kraft (8,0 s), como menciona Hájková *et al.* (2023). Papeles con valores entre 1-2 s se relacionan con papeles tipo secante y aquellos valores entre los 10-22 s se destacan para papel tipo kraft bolsero, caracterizados por tener gramajes de entre $80\text{-}100 \text{ g m}^{-2}$ (Zanuttini, 2008).

En cualquier caso, todos los prototipos de papel se presentaron como altamente permeables, por causa del protocolo de refinado. El cual, provocó una baja resistencia debido a una combinación de una unión deficiente entre las fibras y la condición de fibras pobremente colapsadas; lo que da como resultado una estructura más abierta y porosa con menor resistencia al aire (Santos *et al.*, 2008; Akpabio *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2014; Khantayanuwong *et al.*, 2023); caso corroborado por Karlsson *et al.* (2008) y Salem *et al.* (2021). Asimismo, la cantidad de álcali activo pudo reducir la resistencia y largo de las fibras (Darmawan *et al.*, 2020).

Tabla 7. Propiedades mecánicas de prototipos de papel elaboradas a partir de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Tipo de Pulpa	IB16	IA17	IR18	GP31	SP32
Ring Crush (kg m ⁻¹)	321,44 ^{AB} (17,86)	357,16 ^B (64,39)	232,15 ^A (47,25)	535,74 ^C (17,86)	321,44 ^{AB} (17,86)
STDI (kN m ⁻¹)	1,27 ^{AB} (0,20)	1,43 ^{BC} (0,12)	1,21 ^A (0,13)	2,06 ^D (0,23)	1,72 ^C (0,25)
Porosidad (s 100 mm ⁻¹)	0,40 ^A (0,55)	10,20 ^C (2,39)	0,60 ^A (0,55)	3,60 ^{BC} (0,55)	1,40 ^{AB} (0,55)

Nota: Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar correspondiente con n=3. Letras diferentes indican diferencias significativas al 0,05.

Propiedades energéticas

El poder calórico (Figura 12a), muestra que IB16 presentó el mayor valor registrado (19889,14 kJ kg⁻¹); aunque no se diferencia estadísticamente de SP32, pero sí las demás. En los resultados obtenidos, no se encontraron datos para comparar esta propiedad para la especie en estudio.

Para el contenido de cenizas (Figura 12b), se demostró que IB16, IA17 e IR18 no presentaron diferencias significativas entre sí y destacaron por presentar los contenidos más elevados (0,96% promedio); mientras que las otras pulpas presentaron valores promedio de 0,73%. Con relación a lo anterior, se ha destacado que este contenido es referente a la presencia de carbonatos, oxalatos y silicatos de la fibra; componentes que ralentizan el proceso de pulpado y deben eliminarse (Chauhan *et al.*, 2021; Megra *et al.*, 2022). En el presente estudio todas las fibras utilizadas presentaron un contenido inferior al 2%; y al aplicar la deslignificación se redujo en más de un 20% (Valverde *et al.*, 2022). Según Moreno *et al.* (2012), contenidos menores al 1% justifican una pulpa con calidad deseable; debido a que este componente inorgánico de carácter no volátil puede afectar la calidad final del papel. Asimismo, contenidos altos se relacionan a un consumo anormal de álcali, lo cual tiene que ver con problemas al recuperar el licor de cocción en planta; así como dificultades a la hora de lavar y refinar la pulpa (Neiva *et al.*, 2015; Megra *et al.*, 2022). GP31 y SP32 presentaron valores similares a los obtenidos por Moreno *et*

al. (2012) para *M. textiles* en tallos jóvenes de Filipinas. Vargas *et al.* (2015) encontraron en pulpa de cebada (*H. vulgare*) valores similares de entre 0,78-1,12%, variando según la combinación de los siguientes factores: cantidad de álcali, tiempo y temperatura de cocción.

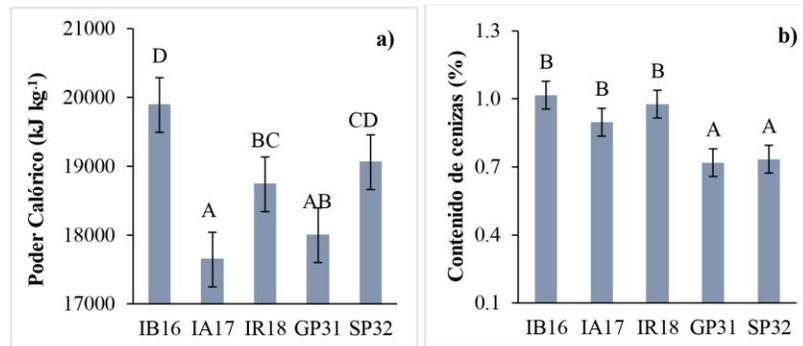


Figura 12. Contenido de a) poder calórico y b) cenizas de prototipos de papel elaboradas a partir de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textiles*.

La figura 13 muestra las curvas termogravimétricas (TGA), que indican la descomposición térmica de las pulpas en un rango de los 20 °C a los 600 °C. Según esto, entre los 20 °C y los 100 °C se puede identificar una pérdida de peso menor asociada a la liberación de agua de la superficie lignocelulósica hidrófila (10%); sin diferencias significativas entre muestras.

Relacionado a lo anterior, se ha reportado que la cantidad de lignina presente en la pulpa influye en la cantidad de humedad absorbida, debido a la presencia de grupos carboxílicos y carbonilos introducidos mediante el sistema enzimático de la lacasa que inhiben los grupos hidroxilos y aumentan el carácter hidrofílico de la lignina, y que como resultado durante el pulpeo alcalino hacen que se está se mineralice y se vuelva solubilizable (Jimenez-Muñoz *et al.*, 2016). A partir de los 100 °C hasta los 260 °C hubo un proceso de estabilización en donde no se presentaron pérdidas de peso ni descomposición térmica notables. A su vez, la mayor descomposición de celulosa y hemicelulosa se produjo de los 260 °C a los 380 °C, en donde se dio una pérdida de masa promedio del 70 % aprox. asociada a la naturaleza de cada genotipo. En específico, IB16 (76,37%) e IA17 (77,37%) fueron los que presentaron mayor pérdida, en comparación con SP32

(69,96%). Dichos resultados difieren a lo descrito por Saragih *et al.* (2020), que destaca que la pulpa de *M. textilis* alcanza su máxima descomposición a los 317 °C hasta los 350 °C; el mismo explica que valores inferiores se deben a la presencia de ligninas y hemicelulosas residuales que no se eliminaron con el proceso de deslignificación. Laftah *et al.* (2015) describe que la estabilidad térmica incrementa al disminuir el contenido de lignina; aunque, a pesar de esto se demostró que las pulpas generadas presentaron valores menores al 6% (Tabla 4). Los resultados concuerdan con lo reportado por Jonoobi *et al.* (2011) en su estudio con fibras de *H. cannabinus*, en donde el mayor proceso de pérdida se dio de los 220 °C a los 330 °C. Finalmente, a partir de los 380 °C se denota la degradación final de la lignina residual; dejando alrededor de un promedio de 9,71% para IB16 de 15,3% para IA17, que forman parte de los residuos remanentes; lo cuales pueden catalogarse como de naturaleza inorgánica.

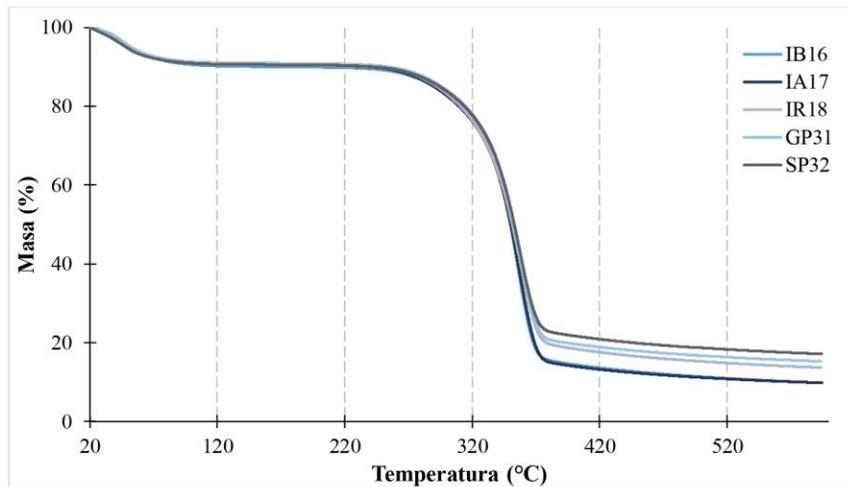


Figura 13. Análisis TGA de prototipos de papel elaboradas a partir de pulpas derivadas de cinco genotipos de *M. textilis*.

Diferencia de prototipos y uso potencial

La caracterización de los prototipos de papel identificó diferencias significativas entre las pulpas, encontrando dos agrupaciones de similitud entre los materiales (Figura 14b). Con una

Conclusiones

La caracterización química demostró que todos los genotipos analizados se encuentran por encima de la media con respecto al estándar de calidad establecido en el mercado. Se obtuvieron contenidos de holocelulosa superiores al 90%; así como contenidos de lignina menores al 6% y de ceniza inferiores al 1%, a través del método de deslignificación a la soda al 18%.

La pulpa proveniente del genotipo IA17 fue la que presentó las mejores condiciones mecánicas, con valores de 3,81 km para longitud de rotura, 30,47 Nm g⁻¹ para índice de tensión, una tensión de rotura del 3,79% y la mayor permeabilidad (10,20 s). Asimismo, GP31 fue la que se caracterizó por presentar el mayor rendimiento (62,63%), densidad (572,53 kg m⁻³) y gramaje (108,06 g m⁻²), así como el menor cambio de color (0,84) respecto a una pulpa comercial y resistencia Ring Crush de 535,74 kg m⁻¹.

Al presentar estas condiciones, se concluye que todas las pulpas bajo el protocolo de pulpado establecido en este estudio pueden destinarse a usos comerciales para producir papeles altamente porosos y de baja densidad como los papeles de filtro y tipo tisú.

Las propiedades mecánicas obtenidas fueron bajas en comparación con las reportadas para pulpas refinadas a más de 2000 revoluciones; por lo cual, para mejorar la calidad del material, se recomienda ampliar la investigación aplicando un protocolo de refinamiento más intenso (velocidades y tiempo de batido); así como una caracterización morfológica de las pulpas, con el fin de determinar el protocolo más efectivo para que se cumpla con una buena colapsabilidad de las fibras y se mejore la capacidad de unión de los filamentos.

En vista de que una gran cantidad de subproductos de los pseudotallos de *M. textilis* aprovechados para exportación se dejan como residuo en cada periodo de cosecha; estos podrían utilizarse como subproducto para la manufactura de pulpas celulósicas. Dicha valorización, puede ser beneficiosa para la economía de los productores, contribuyendo así a la transición del país hacia la bioeconomía circular.

Agradecimientos

Esta investigación formó parte del proyecto de investigación “Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica” código CF 1401093, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) y por el Sistema de Posgrados TEC, mediante el trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica ejecutado por la primera autora. Se agradece al Ing. Mario Mitchell, Ing. Gabriella Sanchez, Ing. Rolando Davis de la Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte, S.A. División Empaques, por la colaboración en el análisis de laboratorio de los diferentes prototipos de papel.

Referencias bibliográficas

Abd El-Sayed, E. S., El-Sakhawy, M. & El-Sakhawy, M. A. M. (2020). Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 35(2), 215-230. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0064>

Akeem Azeez, M., Andrew, J. E. & Sithole, B. B. (2016). A preliminary investigation of Nigerian *Gmelina arborea* and *Bambusa vulgaris* for pulp and paper production. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(1), 65-78. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000007>

Akpabio, U. D. & Akpakpan, A. E. (2012). Pulp and paper from agricultural wastes: plantain pseudostem wastes and Screw pine leaves. *International Journal of Modern Chemistry*, 2(3), 100-107.

Araya-Gutiérrez, D., Monge, G. G., Jiménez-Quesada, K., Arias-Aguilar, D. & Cordero, R. Q. (2023). Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 76(1), 10263-10273. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n1.101710>

ASTM D5865/D5865M-19. (2019). “Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke,” ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19

ASTM D1107-21. (2021). “Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood,” ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <https://doi.org/10.1520/D1107-21>

ASTM D1108-21. (2021). “Standard Test Method for Dichloromethane Solubles in Wood,” ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <https://doi.org/10.1520/D1108-21>

Bajpai, P. (2018). Brief description of the pulp and papermaking process. En: P. Bajpai (Ed.), *Biotechnology for pulp and paper processing* (2nd ed, pp. 9-26). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7853-8_2

Benitez, J. B., Popo Amu, M., Vallejos, M. E. & Area, M. C. (2019). Calidad de papel artesanal a partir de fibras no convencionales de cinco especies colombianas. *Revista de Ciencia y Tecnología*, (31), 1-10. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-75872019000100005&lng=es&tlng=es

Chauhan, S. & Meena, B. L. (2021). Introduction to pulp and paper industry: Global scenario. *Physical Sciences Reviews*, 6(5), 81-109. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0014>

Climate-data. (2019a). Clima: Guápiles (Costa Rica). *Climate-data*. <https://en.climate-data.org/north-america/costa-rica/limon/guapiles-44985/>

Climate-data. (2019b). Clima: Las Horquetas (Costa Rica). *Climate-data*. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/heredia/las-horquetas-874786/>

Colín-Chávez, C., Soto-Valdez, H., Turrado-Saucedo, J., Rodríguez-Félix, A., Peralta, E., Saucedo-Corona, A. R. & Guzmán-Corona, M. (2021). Papermaking as Potential Use of Fibers from Mexican *Opuntia ficus-indica* Waste. *Biocencia*, 23(1), 141-150. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v23i1.1315>

Darmawan, A., Irawan, B., Ni'mah, H., Roesyadi, A. & Kurniawansyah, F. (2020). Delignification of Abaca Fiber (*Musa textilis*) as potential substitute for *Eucalyptus pellita*. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering, 857(1), 012021.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012021>

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020e. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). FAOSTAT - Forestry Production and Trade. FAO Yearbook of Forest Products.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2021). FAOSTAT - Forestry Production and Trade. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

Ferdous, T., Ni, Y., Quaiyyum, M. A., Uddin, M. N. & Jahan, M. S. (2021). Non-wood fibers: relationships of fiber properties with pulp properties. *ACS omega*, 6(33), 21613-21622. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02933>

Ghasemian, A., Ghaffari, M. & Ashori, A. (2012). Strength-enhancing effect of cationic starch on mixed recycled and virgin pulps. *Carbohydrate polymers*, 87(2), 1269-1274. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.010>

Godfrey, L. (2019). Waste plastic, the challenge facing developing countries—ban it, change it, collect it?. *Recycling*, 4(1), 3. <https://doi.org/10.3390/recycling4010003>

Gölsenboth, F. & Mühlbauer, W. (2010). Abacá-cultivation, extraction and processing. *Industrial applications of natural fibres*, 8, 163-179. <https://doi.org/10.1002/9780470660324.ch7>

Hájková, K., Jurczyková, T., Filipi, M. & Bouček, J. (2023). Chemical pulp from corn stalks. *Biotechnology Reports*, 37, e00786. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00786>

Herberz, T., Barlow, C. Y. & Finkbeiner, M. (2020). Sustainability assessment of a single-use plastics ban. *Sustainability*, 12(9), 3746. <http://dx.doi.org/10.3390/su12093746>

Hikita, Y., Toyoda, T. & Azuma, M. (2001). Weathering testing of timber – discoloration. En: Y. Imamura (Ed.), *High performance utilization of wood for outdoor uses* (pp: 27-32). Press-net, Kyoto, Japan.

Hirondo, M., Hirondo, L. L., Mataya, K. J., Francisco, E., Mazon, A., Natal, P., ... & Catajaya-Mani, M. (2020). Abaca Fiber (*Musa textilis* Nee) and Plastic Post-Consumer Wastes (A/PCW) as Potential Building Material. *Journal of Environmental Science and Management*, (1). https://doi.org/10.47125/jesam/2020_sp1/02

Jahan, M. S., Islam, M. K., Chowdhury, D. N., Moeiz, S. I. & Arman, U. (2007). Pulping and papermaking properties of pati (*Typha*). *Industrial Crops and Products*, 26(3), 259-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.014>

Jayaprakash, K., Osama, A., Rajagopal, R., Goyette, B. & Karthikeyan, O. P. (2022). Agriculture Waste Biomass Repurposed into Natural Fibers: A Circular Bioeconomy Perspective. *Bioengineering*, 9(7), 296. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9070296>

Jeetah, P. & Jaffur, N. (2021). Coconut husk, a lignocellulosic biomass, as a promising engineering material for non-wood paper production. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5622-5636. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1889428>

Jiménez-Muñoz, E., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O. A. & Rodríguez-Laguna, R. (2016). Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 83(197), 232-242.

Jonoobi, M., Harun, J., Tahir, P. M., Shakeri, A., SaifulAzry, S. & Makinejad, M. D. (2011). Physicochemical characterization of pulp and nanofibers from kenaf stem. *Materials Letters*, 65(7), 1098–1100. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.08.054>

Karlsson, H., Beghella, L., Nilsson, L. & Stolpe, L. (2007). Abaca as a reinforcement fibre for softwood pulp. *Tappi Journal*, 6(10), 25-32.

Khan, M. Z. H., Sarkar, M. A. R., Al Imam, F. I., Khan, M. Z. H. & Malinen, R. O. (2014). Paper making from banana pseudo-stem: Characterization and comparison. *Journal of natural fibers*, 11(3), 199-211. <https://doi.org/10.1080/15440478.2013.874962>

- Khantayanuwong, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Pisutpiched, S., Sungkaew, S., ... & Puangsin, B. (2023). Fiber morphology, chemical composition, and properties of kraft pulping handsheet made from four Thailand bamboo species. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2150924. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2150924>
- Kish, R. J. (2018). Using legislation to reduce one-time plastic bag usage. *Economic Affairs*, 38(2), 224-239. <https://doi.org/10.1111/ecaf.12287>
- Laftah, W. A. & Rahaman, W. A. W. A. (2015). Chemical pulping of waste pineapple leaves fiber for kraft paper production. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(3), 254-261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.12.006>
- Makosso-Kallyth, S. & Diday, E. (2022). Principal Component Analysis of Distributional Data. In *Analysis of Distributional Data* (pp. 205-246). Chapman and Hall/CRC.
- Małachowska, E., Dubowik, M., Lipkiewicz, A., Przybysz, K. & Przybysz, P. (2020). Analysis of cellulose pulp characteristics and processing parameters for efficient paper production. *Sustainability*, 12(17), 7219. <https://doi.org/10.3390/su12177219>
- Mannai, F., Ammar, M., Yanez, J. G., Elaloui, E. & Moussaoui, Y. (2017). Alkaline delignification of cactus fibres for pulp and papermaking applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 798-806. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0968-7>
- Mari, E. L., Austria, C. O., Torres, A. S. & Domingo, E. P. (2019). Residual Grade and Waste Abaca Fibers as Reinforcement for Packaging and Printing/Writing Papers from Recycled Fiber. *Philippine Journal of Science*, 148(2), 349-358. <https://philjournalsci.dost.gov.ph/publication/regular-issues/past-issues/87-vol-148-no-2-june-2019/1004-residual-grade-and-waste-abaca-fibers-as-reinforcement-for-packaging-and-printing-writing-papers-from-recycled-fiber>
- Megra, M. B., Bachheti, R. K., Tadesse, M. G. & Worku, L. A. (2022). Evaluation of Pulp and Papermaking Properties of *Melia azedarach*. *Forests*, 13(2), 263. <https://doi.org/10.3390/f13020263>

- Moreno, L. O. & Protacio, C. M. (2012). Chemical composition and pulp properties of abaca (*Musa textilis* Née) cv. Inosa harvested at different stages of stalk maturity. *Annals of Tropical Research*, 34(2), 45-62.
- Muchorski, D. (2006). Tensile properties of paper and paperboard using constant rate of elongation apparatus, revision of T 494 om-01. *Standard-Specific Interest Group Approved Test Method*.
- NagarajaGanesh, B., Rekha, B., Mohanavel, V. & Ganeshan, P. (2023). Exploring the Possibilities of Producing Pulp and Paper from Discarded Lignocellulosic Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2137618. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2137618>
- Neiva, D., Fernandes, L., Araújo, S., Lourenco, A., Gominho, J., Simões, R. & Pereira, H. (2015). Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. *Industrial Crops and Products*, 66, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.016>
- Omotoso, M. A. & Owolabi, A. W. (2015). Pulp and paper evaluation of solid wastes from agricultural produce. *International Journal of Chemistry*, 7(2), 113. <http://dx.doi.org/10.5539/ijc.v7n2p113>
- Ortiz, E. & Soto, C. (2014). *Atlas Digital de Costa Rica 2014*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Otieno, J. O., Okumu, T. N., Adalla, M., Ogutu, F. & Oure, B. (2021). Agricultural Residues as an Alternative Source of Fibre for the Production of Paper in Kenya-A Review. *Asian Journal of Chemical Sciences*, 10(1), 22-37. <https://doi.org/10.9734/AJOCS/2021/v10i119084>
- Pereira, M. A., Rudolf, P. & Kordsachia, O. (2011). Efecto de la carga de sulfito de sodio en el pulpaje NSSC de *E. globulus*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 13(2), 225-234. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000200010>
- Richter, S., Stromann, K. & Müssig, J. (2013). Abacá (*Musa textilis*) grades and their properties—A study of reproducible fibre characterization and a critical evaluation of existing grading systems. *Industrial Crops and Products*, 42, 601-612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.025>

- Rodriguez, K., Altamirano, K., Adden, K., Mora, L.D., Cabraca, J. & Briones, J. (2018). Evaluación de la tensión elástica de papel elaborado a partir de desechos de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Ingeniería*, 28(1), 29-40. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/30587/31228>
- Sable, I., Grinfelds, U., Jansons, A., Vikele, L., Irbe, I., Verovkins, A. & Treimanis, A. (2012). Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). *BioResources*, 7(2), 1771-1783. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/comparison-of-the-properties-of-wood-and-pulp-fibers-from-lodgepole-pine-pinus-contorta-and-scots-pine-pinus-sylvestris/>
- Saeed, H. A. M., Liu, Y. & Chen, H. (2018). Exploring Sudanese agricultural residues as alternative fibers for pulp and paper manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012030>
- Salem, K. S., Naithani, V., Jameel, H., Lucia, L. & Pal, L. (2021). Lignocellulosic fibers from renewable resources using green chemistry for a circular economy. *Global Challenges*, 5(2), 2000065. <https://doi.org/10.1002/gch2.202000065>
- Samariha, A. & Khakifirooz, A. (2011). Application of NSSC pulping to sugarcane bagasse. *BioResources*, 6(3), 3313-3323. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/application-of-nssc-pulping-to-sugarcane-bagasse/>
- Santos, A. J., Anjos, O. M. & Simoes, R. M. (2008). Influence of kraft cooking conditions on the pulp quality of *Eucalyptus globulus*. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 61(2), 148-155.
- Saragih, S. W., Lubis, R., Wirjosentono, B. & Eddyanto. (2018, December). Characteristic of abaca (*Musa textilis*) fiber from Aceh Timur as bioplastic. En: *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2049, No. 1, p. 020058). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5082463>

Saragih, S. W., Wirjosentono, B. & Meliana, Y. (2020). Thermal and Morphological Properties of Cellulose Nanofiber from Pseudo-Stem Fiber of Abaca (*Musa Textilis*). *Macromolecular Symposia*, 391(1), 2000020. <https://doi.org/10.1002/masy.202000020>

Sebio-Puñal, T., Naya, S., López-Beceiro, J., Tarrío-Saavedra, J. & Artiaga, R. (2012). Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1163-1167.

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>

TAPPI T203 om-99. (1999). “Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp, Test Method T 203 cm-99”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T222 om-02. (2002). “Acid-insoluble lignin in wood and pulp, Test Method T 222 om-02”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T460 om-02. (2006). “Air resistance of paper (Gurley method), Test Method T 460 om-02”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T205 om-02. (2006). “Forming handsheets for physical tests of pulp, Test Method TAPPI/ANSI T 205 sp-02”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T204 om-97. (2007). “Solvent Extractives of Wood and Pulp, Test Method T 204 cm-97”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T207 om-07. (2007). “Water solubility of wood and pulp, Test Method T 207 cm-07”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T211 om-02. (2007). “Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C, Test Method T 211 om-02”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T822 om-02. (2007). “Ring crush of paperboard (rigid support method), Test Method T 822 om-02”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T402 om-08. (2013). “Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products, Test Method TAPPI/ANSI T 402 sp-08”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T410 om-08. (2013). “Grammage of paper and paperboard (weight per unit area), Test Method TAPPI/ANSI T 410 om-09”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T826 om-08. (2013). “Short span compressive strength of containerboard, Test Method TAPPI/ANSI T 826 om-08”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T212 om-18. (2018). “One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp, Test Method T 212 om-18”. TappiPress. Atlanta, GA.

TAPPI T412 om-22. (2022). “Moisture in pulp, paper and paperboard, Test Method TAPPI/ANSI T 412 om-22”. TappiPress. Atlanta, GA. Tiseo, I. (02 de junio 2022). Global paper industry - statistics & facts. *STATISTA*. https://www.statista.com/topics/1701/paper-industry/#topicHeader_wrapper

Udohitinah, J. S. & Oluwadare, A. O. (2011). Pulping properties of kraft pulp of Nigerian-grown kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). *BioResources*, 6(1), 751-761. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/pulping-properties-of-kraft-pulp-of-nigerian-grown-kenaf-hibiscus-cannabinus-/>

Valverde, J. C., Araya, M., Arias-Aguilar, D., Masís, C. & Muñoz, F. (2022). Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of *Musa textilis* Fiber Grown in the Tropical Region. *Polymers*, 14(9), 1772. <https://doi.org/10.3390/polym14091772>

Vargas, F., González, Z., Rojas, O. J., Garrote, G. & Rodríguez, A. (2015). Barley Straw (*Hordeum vulgare*) as a supplementary raw material for *Eucalyptus camaldulensis* and *Pinus sylvestris* kraft pulp in the paper industry. *BioResources*, 10(2), 3682-3693. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/barley-straw-hordeum-vulgare-as-a-supplementary-raw-material-for-eucalyptus-camaldulensis-and-pinus-sylvestris-kraft-pulp-in-the-paper-industry/>

Wise, L. E. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade*, 122, 35-43.

Zanuttini, M. (2008). Propiedades del papel. En: M. C. Area (Ed.), *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica 2008*. (1er ed., pp. 236–275). Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel-Riadicypp.



Figura 19. Fibra de abacá en tendedores para el secado al sol.

9.4 Resultados del OE4. Transferir los conocimientos generados a productores y extensionistas de abacá a nivel nacional.

9.4.1 Elaboración y publicación de un manual del cultivo de abacá en Costa Rica

En el 2022 se completó el manual del cultivo de abacá diseñado para productores. Este manual tuvo la participación y revisión del personal técnico de la empresa Nippon Paper Papyrus Costa Rica y se ha utilizado como material base para las capacitaciones de campo. Está escrito de manera sencilla para su fácil seguimiento y considera las mejores experiencias para el manejo sostenible del cultivo. Incluye recomendaciones para el establecimiento de los sistemas agroforestales.

El manual está disponible en un Blog que contiene todas las publicaciones del proyecto y es de consulta por parte de las personas productoras e interesados mediante el siguiente enlace:

<https://sites.google.com/view/abaca-agroforestal-costa-rica/inicio>

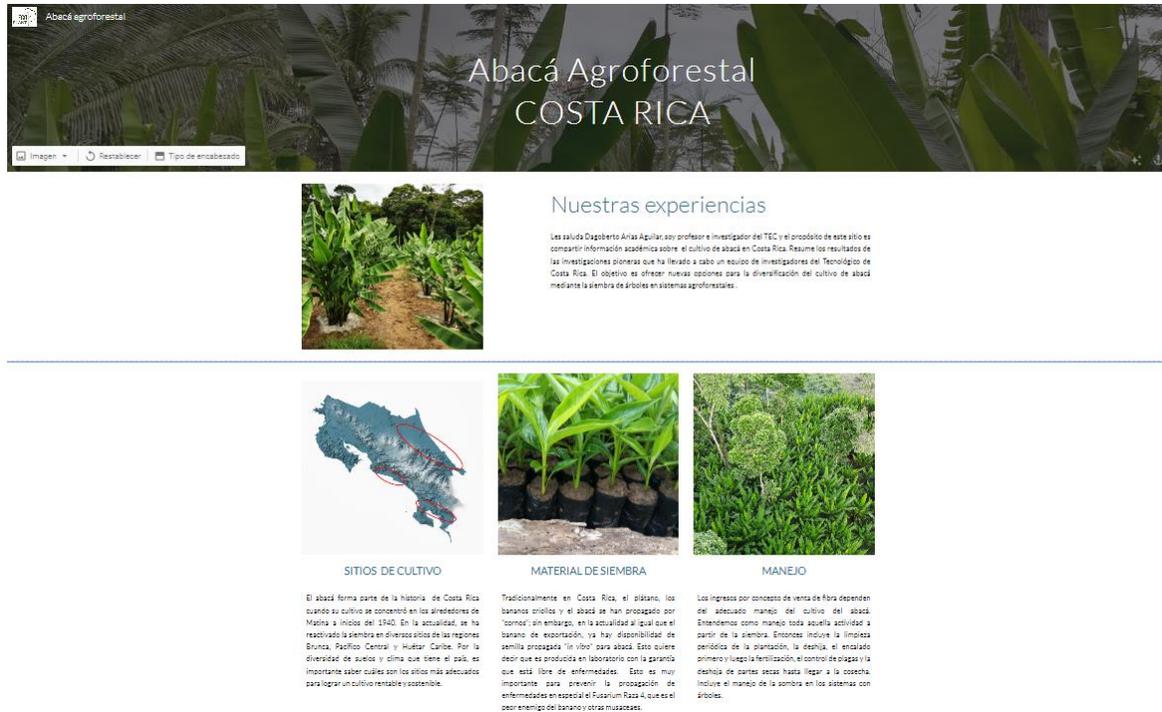


Figura 20. Vista de la página en internet con toda la información generada en el proyecto.

El manual del cultivo de abacá en Costa Rica se encuentra disponible en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1EJBAWyBwL42V3pkcQ2l6weBhFzE5e03-/view?usp=drive_link

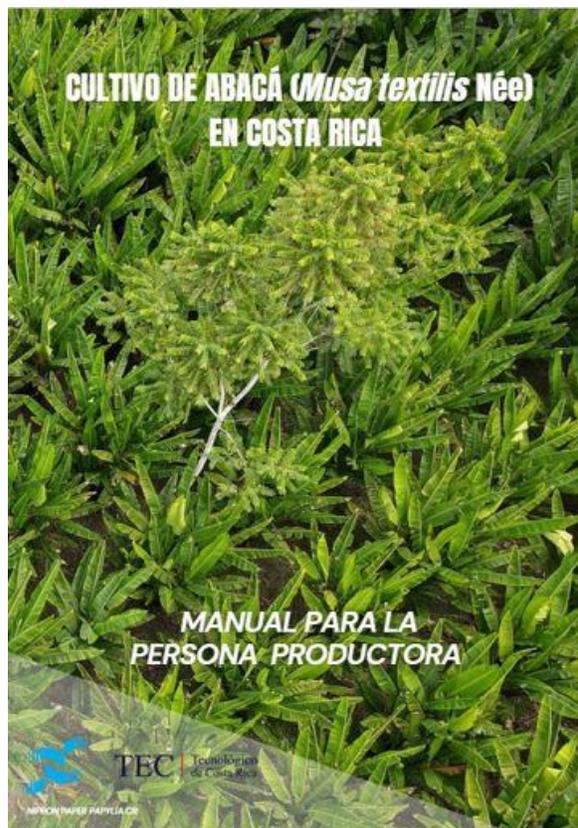


Figura 21. Portada del manual para personas productoras de abacá en Costa Rica

9.4.2 Carpeta de contenidos para capacitaciones

Todo el material reunido en los años del proyecto ha sido colocado en un BLOG que contiene descripción importante del abacá, incluye el manual para personas productoras, las fichas técnicas de especies forestales para sistemas agroforestales, las publicaciones científicas, también videos y presentaciones de congresos. Todo el material está disponible para descarga gratuita.

El enlace del BLOG es el siguiente: <https://sites.google.com/view/abaca-agroforestal-costa-rica/inicio>



Figura 22. Detalle interno del BLOG para consulta de todos los resultados del proyecto

9.4.3 Publicación de 4 artículos científicos

En los compromisos de productos del proyecto se definió la publicación de 4 artículos científicos. En la Tabla 10 se detallan los entregables por parte del equipo de investigadores:

Tabla 10. Detalles de las publicaciones logradas por el equipo de investigadores

Título de la publicación	Revista	Cita y autores	Observaciones
Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales.	Tecnología en Marcha	Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Muñoz-Acosta, F; Camacho-Calvo, A.M; Garro-Monge, G; Jiménez-Quesada, K; Mora-Molina, J. Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales. Tecnología en Marcha. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 50-59. https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6235	Publicado en 2022
Crecimiento y desarrollo inicial de <i>Musa textilis</i> Née y su interacción con las especies maderables <i>Cordia alliodora</i> , <i>Hieronyma alchorneoides</i> y <i>Dipterix panamensis</i> en Costa Rica.	Tecnología en Marcha	Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Mora-Molina, J. Crecimiento y desarrollo inicial de <i>Musa textilis</i> Née y su interacción con las especies maderables <i>Cordia alliodora</i> , <i>Hieronyma alchorneoides</i> y <i>Dipterix panamensis</i> en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 40-49. https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6234	Publicado en 2022
Experiencias del TEC en la generación de conocimiento sobre el cultivo de abacá en acompañamiento a las personas productoras de la Zona Norte y Atlántica de Costa Rica	InvestigaTEC	Arias-Aguilar, D. Experiencias del TEC en la generación de conocimiento sobre el cultivo de abacá en acompañamiento a las personas productoras de la Zona Norte y Atlántica de Costa Rica. InvestigaTEC, Vol. 16, Número 46. Enero 2023. Pág. 26-32	Publicado en 2023
Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world.	Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín	Araya Gutierrez, D., Garro Monge, G., Jimenez Quesada, K., Arias Aguilar, D. and Quesada Cordero, R. (2023). Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 76(1), 10263–10273. https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n1.101710	Publicado en 2023

Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of <i>Musa textilis</i> Fiber Grown in the Tropical Region.	Polymers	Valverde, J.C.; Araya, M.; Arias-Aguilar, D.; Masís, C.; Muñoz, F. Evaluation of the Optimal Uses of Five Genotypes of <i>Musa textilis</i> Fiber Grown in the Tropical Region. <i>Polymers</i> 2022, 14, 1772. https://doi.org/10.3390/polym14091772	Publicado en 2022
Effects of <i>Musa textilis</i> fiber loadings in physical-mechanical properties of recycled thermoplastic compounds	Fiber and polymers	Muñoz-Acosta, F.; Gaitán-Álvarez, J.; Arias-Aguilar, D.; Valverde-Otarola, J.C.; Garro-Monge, G.; Mora-Molina, J. 2023. Effects of <i>Musa textilis</i> fiber loadings in physical-mechanical properties of recycled thermoplastic compounds. <i>Fibers and Polymers</i>	Sometido a la Revista <i>Fiber and Polymers</i> . Está en evaluación
Evaluación de prototipos de papel elaborados a partir de cinco genotipos comerciales de <i>Musa textilis</i> Née cultivados en la región tropical	Por definir	Araya-Salas, M.; Arias-Aguilar, D.; Valverde-Otarola, J.C. 2023. Evaluación de prototipos de papel elaborados a partir de cinco genotipos comerciales de <i>Musa textilis</i> Née cultivados en la región tropical	En traducción para someter a revista

9.4.4 Talleres y días de campo para productores y profesionales

El proyecto definió la realización de talleres y días de campo para tratar temas relevantes. Dado que el proyecto inicio en enero del 2020 y coincidió con los meses de la pandemia del COVID 19, muchas actividades presenciales fueron limitadas, por ello la mayoría de los eventos de capacitación se trasladaron para el año 2021 y particularmente 2022.

En la Tabla 11, se presenta el detalle de los 11 talleres y días de campo organizados por el proyecto.

Tabla 11. Detalle de todas las actividades de capacitación llevadas a cabo en la vigencia del proyecto

Evento	Lugar	Fecha	# Participantes	Descripción
Capacitación de productores de abacá en aspectos generales sobre el cultivo de abacá y cosecha	La Chavez, Horquetas Sarapiquí, Heredia	30 enero 2020	8	Se trató sobre información, manejo y mantenimiento del cultivo y dar resultados de investigaciones realizadas
Capacitación de productores de abacá en aspectos generales sobre el cultivo de abacá y cosecha	Finca Agua, Horquetas Sarapiquí, Heredia	1 diciembre 2021	20	Se trató sobre información, manejo y mantenimiento del cultivo y dar resultados de investigaciones realizadas
Capacitación de productores de abacá en aspectos generales sobre	La Chavez, Horquetas Sarapiquí, Heredia	2 marzo 2022	23	Se trató sobre el manejo y mantenimiento del cultivo y lo

el cultivo de abacá y cosecha				relacionado a la cosecha.
Capacitación de productores de abacá en aspectos generales sobre el cultivo de abacá y cosecha	La Morenita, Guácimo, Limón	26 abril 2022	15	Se trató sobre información, manejo y mantenimiento del cultivo y dar resultados de investigaciones realizadas
Presentación del cultivo de abacá como opción para diversificación de cultivos en zona sur de Costa Rica	Piedras Blancas, Puntarenas	22 junio 2022	27	Se trató sobre el manejo y mantenimiento del cultivo y lo relacionado a la cosecha.
Charla para el control fitosanitario en las plantaciones de abacá	La Chavez, Horquetas Sarapiquí, Heredia	20 julio 2022	9	Se trató sobre las medidas a tomar para prevención de enfermedades y desinfección de herramientas y calzado
Charla experiencias del abacá y convivio entre productores	Guápiles, Limón	27 julio 2022	28	Se trató sobre experiencias y charlas para productores
Información para interesados en el cultivo de abacá	Restaurante, Palmitour, Horquetas, Sarapiquí	05 agosto 2022	35	Se trató sobre información, manejo y mantenimiento del cultivo
Aspectos generales sobre el cultivo de abacá y cosecha	Río Claro, Puntarenas	21 setiembre 2022	19	Se trató sobre información, manejo y mantenimiento del cultivo y dar resultados de investigaciones realizadas

Charla para el control fitosanitario en las plantaciones de abacá	La Chavez, Horquetas Sarapiquí, Heredia	20 febrero 2023	25	Se trató sobre las medidas a tomar para prevención de enfermedades y desinfección de herramientas y calzado
Taller para elaboración de papel a partir de fibras de abacá	CATIE, Turrialba	25 de mayo del 2023	11	Se capacitó a un grupo de mujeres a preparar la fibra de abacá, extraer la lignina y elaborar láminas de papel para uso artesanal



Figura 23. Imágenes de las diferentes actividades de capacitación para las personas productoras de abacá.



Figura 24. Participantes del taller de elaboración de papel sostenible con fibras naturales. 25 de mayo 2023 en CATIE, Turrialba.

El material del taller puede ser consultado en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1R7sANW7vBF060v4iJCvF7qkTfmD2evDN/view?usp=drive_link

9.4.5 Seminario Internacional de uso de fibras

Uno de los compromisos del proyecto fue la organización de un evento nacional sobre las posibilidades de uso de las fibras de abacá. El evento fue organizado de manera conjunta con el Dr. Roel Campos, coordinador del proyecto de investigación "Evaluación del uso potencial de fibras naturales como biomaterial" de la Escuela de Agronegocios.

El evento tuvo un alcance internacional con la participación de 3 expositoras: Dra. Belkis Coromoto Sulbarán Rangel, Profesora e investigadora de la Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá). México. Con el tema: Bioeconomía en México a partir de residuos agroindustriales del bagazo de agave y el olote de maíz: Materiales y biogás

La Dra. Priscilla Vergara, Técnico I+D+i en el grupo de celulosa de papel en el Departamento de Productos Forestales, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC). España, con el tema: Papel y cartón: Tipos. Diseño de producto papelerero. El embalaje de papel como alternativa al plástico

La Dra. Paola Torres, investigadora y docente de la Facultad de Ciencias Agrarias, Programa de ingeniería Forestal, Universidad del Cauca (UNICAUCA). Colombia, con el tema Biorrefinerías forestales: aprendizajes desde la ecología de la degradación de la madera.

La logística estuvo a cargo del Dr. Dagoberto Arias Aguilar y se participó a colegas de la UNED, UNA y UCR para un alcance interuniversitario.



Figura 25. Invitación y detalle del cierre de la actividad con las expositoras de Colombia, España y México.



La Escuela de Agronegocios y la Escuela de Ingeniería Forestal tienen el agrado de invitar al I Seminario Internacional Interuniversitario

“Bioeconomía Circular: subproductos lignocelulósicos y retos de aplicación en Costa Rica”

Moderadores: Dr. Dagoberto Arias (TEC) y M. Eng. Rodolfo Hernández Chaverri (UNED)

Personas Expositoras:

Dra. Belkís Coromoto Sulbarán Rangel

Profesora e investigadora de la Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá). México

Tema: Bioeconomía en México a partir de residuos agroindustriales del bagazo de agave y el olote de maíz: Materiales y biogás

Dra. Priscilla Vergara

Técnico I+D+i en el grupo de celulosa de papel en el Departamento de Productos Forestales, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC). España

Tema: Papel y cartón: Tipos. Diseño de producto papelerero. El embalaje de papel como alternativa al plástico

Dra. Paola Torres

Investigadora y docente de la Facultad de Ciencias Agrarias, Programa de ingeniería Forestal, Universidad del Cauca (UNICAUCA). Colombia

Tema: Biorrefinerías forestales: aprendizajes desde la ecología de la degradación de la madera

Fecha y hora: Martes 23 de mayo de 8:30 a 11:30 a.m.

Enlace del TEC: Facebook Unidad de Vinculación Forestal TEC

<https://www.facebook.com/profile.php?id=100057048115787&sk=about>

Este Seminario forma parte de las actividades de divulgación de los proyectos:

“Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica”, donde participan los investigadores:

Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph. D. Coordinador
Ing. Freddy Muñoz Acosta
Ing. Giovanni Garro Monge
Ing. Karol Jiménez Quesada
Ing. Jesús Mora Molina
Ing. Marlen Camacho
Ing. Luis Barboza Fallas

Evaluación del uso Potencial de Fibras Naturales como Biomaterial código 1431034, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC, donde participan los investigadores

Ing. Rooel Campos Rodríguez, Ph.D Coordinador
Ing. Laura Brenes Peralta, Ph.D
Ing. María Fernanda Jiménez Morales. M.Sc
Ing. Felipe Vaquerano Pineda. M.Sc

9.4.6 Participación en seminario organizado por la Unidad de Vinculación Forestal.

Con el título “Avances en los sistemas de producción de fibras para exportación y su componente agroforestal” el día 21 de julio del 2021 se compartió con más de 70 personas por medio de un evento virtual, los aspectos y resultados más importantes sobre las investigaciones del abacá en sistemas agroforestales.

Los detalles están respaldados en el siguiente video de YouTube: <https://youtu.be/HoPd-4NcoGg?si=jNAOasdGrCZlqpw5>



Figura 26. Imagen de inicio de la exposición sobre los avances del proyecto en una actividad dirigida a todo público y con participación de más de 70 personas.

9.4.7 Participación en congresos

Summer Campus 2022 en Alemania

El Dr. Dagoberto Arias Aguilar participó en el seminario internacional “International liveSciences³ Summer Campus 2022 “Shaping Future Landscapes” organizado por la Universidad de Göttingen en Alemania. En esta oportunidad estuvo en calidad de expositor con la presentación “Agroforestry landuse system in Costa Rica”. El evento mencionado estuvo dirigido a 30 profesores y estudiantes de intercambio de Chile, Costa Rica, Bosnia y Alemania. Se llevó a cabo del 15 al 26 de agosto del 2022. Se divulgaron los resultados del proyecto sobre las experiencias en el uso de árboles en sistemas agroforestales con abacá.

Certificate of participation

of attendance for the International liveSciences³ Summer Campus 2022 "Shaping Future Landscapes" organized by liveSciences³ project, the University of Göttingen, Germany from the 15th until the 26th of August 2022

Nearly 30 Göttingen and international students, together with numerous experienced scientists from Göttingen University and liveSciences³ partner universities (University of Talca, Chile; Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica; and University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina), explored global perspectives on the innovative and sustainable transformations of landscapes.

Speaker

Dr. Dagoberto Arias Aguilar

Title of the presentation

"Agroforestry landuse system in Costa Rica"

Date

25.08.2022

Jana Weigel on behalf of the LiveScience³ team

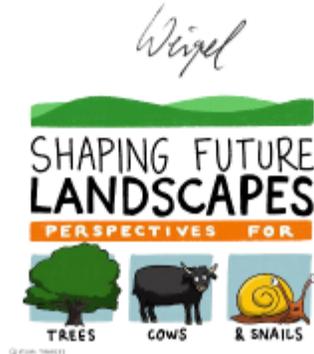


Figura 27. Certificado de participación en evento en Alemania con divulgación sobre resultados del proyecto. Estudio de caso en Costa Rica

X Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos (XSIIR) en España

El Dr. Dagoberto Arias Aguilar participó de manera presencial en el X Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos (XSIIR): "Hacia la circularidad y el residuo cero", que se celebró en Castelló de la Plana (España) del 19 al 23 de junio del 2023.

En este evento asistieron 200 personas y se presentaron 175 trabajos. Las 21 sesiones estuvieron moderadas por miembros de la Red REDISA. La ponencia presentada el día jueves 22 de junio por



la mañana tuvo como título “Uso de fibras a partir de residuos de musáceas para elaboración de tableros de partículas”

Los trabajos escritos presentados y defendidos en el simposio, de forma oral o póster, se publicaron en un Libro de Actas digital con ISBN que se puede acceder en este enlace <https://www.fue.uji.es/xsimposioredisa>



X SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE RESIDUOS

Hacia la circularidad y el residuo cero
Castelló de la Plana (España), 20, 21 y 22 de junio de 2023

CERTIFICADO DE COMUNICACIÓN

Dña. María Dolores Bovea Edo, Secretaria del X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, certifica que:

Dagoberto Arias Aguilar

Ha presentado la comunicación:

**USO DE FIBRAS A PARTIR DE RESIDUOS DE MUSASEAES PARA
ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS**

En la que figuran como autores:

Dagoberto Arias Aguilar , Kevin Arias Ceciliano , Salas Araya

en el X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, organizado por la Universitat Jaume I y REDISA, celebrado los días 20, 21 y 22 de junio de 2023.

D. Antonio Gallardo Izquierdo
Presidente del Comité Organizador y
Coordinador de REDISA



Dña. María Dolores Bovea Edo
Secretaria del Comité Organizador

Castelló de la Plana, a 22 de junio del 2023



Figura 28. Certificado de participación en el simposio internacional en España 2023

9.4.8 XV Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y ambiental CONAFA 2023 y el X Congreso Nacional de Suelos

El Dr. Dagoberto Arias Aguilar participó de manera presencial en el XV Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y ambiental CONAFA 2023 y el X Congreso Nacional de Suelos, realizado en el Hotel Intercontinental en San José, del 12 al 14 de junio del 2023.

La ponencia presentada llevó como “Experiencias de sistemas agroforestales con el cultivo de abacá (*Musa textiles*)” y correspondió a la entrega a nivel nacional de los resultados más significativos del proyecto de investigación. Los detalles pueden ser consultados en el siguiente enlace: <https://campus.conafacr.com/cursos/experiencias-de-sistemas-agroforestales-con-el-cultivo-de-abaca-musa-textiles/>

Adicionalmente y con el apoyo de la Dirección de Posgrado también participó en representación del TEC, la M. Sc. Mónica Araya Salas quien realizó la ponencia oral titulada: “Prototipos de papel elaborado a partir de cinco genotipos comerciales de *Musa textile* Neé cultivados en la región tropical”.



Figura 29. Certificado de participación en el CONAFA 2023 con presentación de resultados del proyecto

9.4.9 Participación en concurso Emprendedor Forestal de México

Con apoyo del proyecto de investigación y la facilitación del Dr. Jesús Mora Molina se brindaron todas las condiciones para que un equipo de estudiantes participara en un concurso internacional denominado Joven Emprendedor Forestal Latinoamericano 2022. Los estudiantes Mónica Araya Salas, de la maestría en Ciencias Forestales; Hanzel León González y Sebastián Montoya Díaz, de la carrera de Ingeniería Forestal del TEC y Sebastián Sánchez Guzmán, de la carrera de Ingeniería en Diseño Industrial fueron los participantes y ganadores.

La idea de emprendimiento ganadora fue un biogel elaborado a partir de los residuos celulósicos de las fibras de abacá que mediante un proceso de transformación llegan hasta la obtención de la celulosa y luego un biomaterial absorbente y retenedor de agua para ser utilizado como enmienda en suelos y suministrar agua en las épocas críticas para los cultivos.

El concurso consistía en que estudiantes y docentes de las carreras relacionadas a las ciencias de la tierra generaran ideas de emprendimiento forestal que impacten positivamente en el desarrollo sostenible de la región latinoamericana. Por un período superior a los 6 meses se tuvieron diversas capacitaciones y se tuvo el seguimiento de trabajo en los laboratorios.

En el siguiente enlace se comparte la noticia sobre el logro alcanzado: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2022/06/09/ticos-triunfan-mexico-proyecto-biogel-hidratacion-suelo>

9.4.10 Participación en un curso internacional totalmente financiado por la AECID.

La Agencia Española de Cooperación Internacional (AECID), a través del Centro de Formación de la Cooperación Española en La Antigua Guatemala, en colaboración con la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España y el Centro Nacional Instituto de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) de España, organizaron el curso presencial “Bioeconomía Circular en el Sector Industrial Ligno-Celulósico y su Contribución a la Mitigación del Cambio Climático” a realizarse del 17 al 21 de abril de 2023.

El Dr. Dagoberto Arias Aguilar concursó y ganó una beca completa para asistir a dicho curso internacional. En el siguiente enlace se muestran los detalles: <https://intercoonecta.aecid.es/programaci%C3%B3n-de-actividades/bioeconom-a-circular-retos-y-opportunidades-en-el-desarrollo-de-las-biorrefiner-as-para-la-obtenci-n-de-bioenerg-a-y-bioproductos>

10 Propuestas de nuevos proyectos de investigación para dar continuidad a las investigaciones

10.1 Nueva propuesta: “Cultivo comercial del árbol *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) para la producción de caucho natural en zonas rurales de Costa Rica”

En la convocatoria de proyectos VIE 2022 se trabajó en un nuevo proyecto que daría continuidad a los sistemas agroforestales con cultivos de exportación. Formalmente se presentó el proyecto “Cultivo comercial del árbol *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) para la producción de caucho natural en zonas rurales de Costa Rica”, el cual fue aprobado por el Consejo de Investigación y Extensión (CIE) en la Sesión Ordinaria No. 08-2022, Parte IV, “Convocatoria por fondos concursables de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión 2022”, Artículo 10.53, del 7 de abril del 2022.

Este proyecto dio inicio el 01 de julio del 2022 y plantea la combinación del árbol de hule con el cultivo de abacá utilizando la misma red de ensayos del proyecto concluido mediante este informe. El período de ejecución es del 01 de julio 2022 al 20 de junio del 2025.

10.2 Formulación de propuesta para convocatoria MIDEPLAN/Unión Europea 2022

En los meses de junio y julio del 2022, un equipo de investigadores del proyecto atendió al proceso de formulación de una nueva propuesta para concursar por fondos externos a través de MIDEPLAN en la administración de fondos de cooperación de la Unión Europea.

La propuesta cumplió con todos los requisitos de formulación y se tituló proyecto “Reactivación económica de las familias rurales, mediante la generación de capacidades productivas en la cadena de producción de madera y de fibras naturales para la exportación mediante sistemas agroforestales mixtos sostenibles: abacá y árboles maderables”. Fue conocida y aprobada por el Consejo de Escuela de Ingeniería Forestal en la Sesión Ordinaria 13-2021, Artículo 6, inciso 1, celebrada el 23 de agosto del 2021 y enviada a la VIE.

La oferta de proyecto se ubica dentro de las líneas de investigación y extensión aprobadas por la Escuela de Ingeniería Forestal, para el periodo 2018-2022, a saber: Calidad y productividad de plantaciones forestales, en el eje estratégico de conocimiento: Hábitat e Industria y con los ejes transversales: Tecnología, Sostenibilidad-Género-Innovación y se alinea con la Estrategia Económica Territorial para una Economía Inclusiva y Descarbonizada 2020-2050 Costa Rica para impactar en los polos 8. Agrícola-Logístico de Guápiles y 9. Portuario del Caribe Limón-Cahuita.

Reactivación económica de las familias rurales, mediante la generación de capacidades productivas en la cadena de producción de madera y de fibras naturales para la exportación mediante sistemas agroforestales mixtos sostenibles: abacá y árboles maderables.



Coordinador:

Dagoberto Arias Aguilar

Investigadores participantes:

Casia Soto Montoya

María Rodríguez

Nelson Zamora Villalobos

Freddy Muñoz Acosta

Figura 30. Portada de la propuesta de nuevo proyecto sometido a consideración de la VIE y de MIDEPLAN

10.3 Nuevo trabajo final de graduación a partir de julio del 2023

Un trabajo de graduación de la Escuela de Diseño Industrial a cargo del estudiante Emilio Mora Quintanilla está estudiando las máquinas para extraer fibra y su trabajo lleva como título “Rediseño de interfase humano-máquina en la desfibradora de abacá tipo 'deco'.” Este trabajo es muy importante porque atiende el abordaje tecnológico de una de las recomendaciones de esta investigación y que debe ser atendido en este orden: seguridad a los trabajadores, calidad de fibra y productividad de la operación. Los resultados de este trabajo se presentarán a finales del 2023. Esta actividad no forma parte de los compromisos del proyecto de investigación, pero es una necesidad su atención.



Figura 31. Visita de campo del estudiante Emilio Mora Quitanilla para conocer los detalles de usabilidad de la máquina “deco” y entrevista con los trabajadores sobre aspectos ergonómicos y sugerencia de mejora para la máquina.

11 Principales conclusiones

Cada publicación generada en el proyecto conlleva conclusiones específicas, y en esta sección se presentan las conclusiones generales:

- Se generó nuevo conocimiento sobre el manejo del cultivo del abacá en Costa Rica en asocio con árboles maderables tales como el laurel, balsa, gallinazo, cedro amargo, melina, almendro, cashá, caoba y pilón. Este conocimiento incluye el comportamiento de las especies, el manejo, el crecimiento inicial, el uso de la sombra y análisis de productividad y calidad.
- En la actualidad los productores de abacá pueden tomar mejores decisiones para incluir árboles maderables en sus fincas y mejorar sustancialmente el flujo de caja con beneficio ambiental y también optar por incentivos del FONAFIFO.
- Se estudió el comportamiento del crecimiento de los árboles que fue positivamente influenciado bajo la sombra inicial de las plantas de abacá, el manejo de la fertilidad y la reducción de la competencia con malezas.
- El proyecto logró demostrar el beneficio de la sombra de los árboles en el cultivo del abacá especialmente su impacto en las variables de crecimiento del abacá y la calidad de la fibra. No obstante, la sombra no debe sobrepasar el 40% de sombra y los árboles deben manejarse mediante podas para permitir iluminación en el sistema.

- Se logró determinar que la productividad del cultivo del abacá es susceptible a la acidez del suelo y que requiere de una adecuada selección previa de los sitios, así como un manejo particular en la aplicación de materiales de encalado del suelo.
- Dentro del manejo del cultivo del abacá con árboles, el control de malezas, la deshija y la fertilización son fundamentales para mejorar el rendimiento, siendo la línea base de producción al menos 2 toneladas de fibra seca por hectárea en la primera cosecha año y en sitios óptimos lograr de manera sostenida las 4 toneladas por año.
- Mediante los análisis de suelos en las diferentes fincas bajo estudio, se determinó que es fundamental un análisis químico previo del suelo, pero además es indispensable realizar un análisis microbiológico del suelo. La combinación de niveles altos de acidez con la presencia de microorganismos patógenos es un criterio para descartar fincas para el cultivo de abacá.
- La necesidad de disponer de semilla libre de enfermedades motivó a los investigadores del TEC a generar el protocolo de desinfección, multiplicación y aclimatación de cultivo de abacá *in vitro*.
- Actualmente a través de organizaciones y empresas ya se dispone de plantas “*in vitro*”. El INTA ha jugado un papel muy importante en el suministro de materiales de siembra en cantidad y calidad para los productores que quieran ampliar o iniciar con nuevos cultivos.
- El proyecto ha generado información muy importante sobre las características de la calidad de la fibra y ha logrado demostrar que la resistencia y permeabilidad pueden ser mejores que la fibra producida en otros países. Para ciertos mercados es muy importante una calidad uniforme de la fibra y se puede pagar más al productor.

12 Principales recomendaciones

La experiencia generada en el proyecto logró identificar nuevas necesidades de soluciones tecnológicas, que deberán ser abordadas en el corto plazo. Se enumeran las siguientes:

- El sistema tradicional de obtención de la fibra se hace con un tipo de máquina conocido como “Deco” y su funcionamiento es muy manual, lo cual incide en la seguridad de los trabajadores, la estructura de los costos, también incide en aspectos de la calidad de la fibra obtenida. Un reto tecnológico importante es generar una mejora en la máquina de tal manera que se logren dos cosas: por un lado, la semi automatización del proceso y por otro lado se logre otra manera de raspar la fibra tal y como se hace con las máquinas en Ecuador conocidas como “Spindle”. La solución de este sistema sería una innovación tecnológica internacional, ya que no existe algo similar y podría solucionar la extracción de otros tipos de fibra como el de la hoja de la piña.

- Si bien es cierto se tienen importantes avances de cultivo “*in vitro*”, poco o nada se ha estudiado en el país sobre el potencial de mejoramiento genético a partir del material existente, que permita mayor rendimiento, calidad de la fibra, adaptación a plagas y enfermedades y a las condiciones de sitio. Este es un campo importante para investigación y desarrollo. De igual manera realizar estudios más detallados sobre la viabilidad de las semillas de abacá y pruebas de polinización.
- Para usos muy especializados de la fibra, la presencia de impurezas en la etapa de pulpeo es un aspecto sensible en la calidad. Los análisis de calidad de fibra de Costa Rica evidencian la presencia de impurezas que pueden estar relacionadas al método de extracción de las fibras y la presencia de compuestos propios de los tejidos de la planta (células silíceas). Este aspecto requiere de mayor investigación y solución.
- Los sistemas de producción a nivel de finca a pequeña escala (menos de 3 has) inciden en mayores costos y menos ingresos al productor. Es importante que la actividad de la producción de abacá se maneje como núcleos de producción, en donde varios productores en distancias cortas puedan llevar el material preparado (cáscaras) a centros de desfibrado donde se dispongan de máquinas que funcionen con electricidad y procesos semi automatizados.
- Este proyecto abre nuevas posibilidades para continuar los estudios sobre nuevos usos de la fibra buscando generar mayor valor agregado en el país y ofreciendo alternativas de uso de un biomaterial que puede ser utilizado como refuerzo en materiales compuestos. Las características de la fibra ofrecen gran potencial para combinaciones con residuos de madera, cemento y plástico.
- Se deben continuar las investigaciones sobre la susceptibilidad del cultivo del abacá a los microorganismos patógenos, especialmente en fincas con usos anteriores en tubérculos y palmito y continuar los ensayos con control biológico.

13 Agradecimientos

El primer agradecimiento se extiende al equipo de investigadores ya referidos en este informe y muy especialmente al grupo de estudiantes que participaron activamente en todas las actividades del proyecto. Un agradecimiento y reconocimiento muy especial a la M.Sc. Mónica Araya Salas por el desarrollo exitoso de su tesis de maestría y por los nuevos conocimientos generados sobre el uso de fibras como biomaterial. A los ingenieros Ing. Kevin Arias Ceciliano, Ing. Cynthia Monge, Ing. Adriana Fallas Cosio por su participación con proyectos de graduación específicos. A los siguientes estudiantes y profesionales que participaron en las diferentes etapas del proyecto: Hanzel León González, Sebastián Antonio Sánchez Guzmán, Randall Christopher Quesada Cordero, David José Araya Gutiérrez, Monica Araya Salas, Adriana Fallas Cosio, Nicole Aguilar Román, Manuel Andrés Castro Delgado, Diego Armando Gómez Arias, Brayan Alonso Villalobos Quintanilla, Geovanny Andrés Villalta, Kevin Arias Ceciliano, Alexandra Castro. A todas estas personas un profundo agradecimiento.

Al programa de Becas CeNAT-CONARE y los funcionarios Ing. Cornelia Miller, Ing. Heileen Aguilar, por el apoyo y colaboración en gran parte de las actividades del proyecto de graduación de la Adriana Fallas Cosio. A la profesora M.Sc. Maribel Jiménez por la tutoría del trabajo de Cynthia Monge.

A la empresa Nippon Paper Papylia Costa Rica y su equipo de trabajo, especialmente al señor Kobayashi Shigeru y la señora Sachi Kawakubo, por la oportunidad y contribución para desarrollar un componente específico de este proyecto y por las sinergias generadas a través de PROCOMER, INTA, LANOTEC, CENIBIOT, empresas privadas y productores.

Al Ing. Luis Diego Jiménez del CATIE por estar presente y acompañar técnicamente todo el proceso de implementación del proyecto, facilitar las fincas de CATIE, los invernaderos, las plántulas y brindar mantenimiento a la red de ensayos.

Al Ing. Luis Matarrita representante de la empresa IPS por permitir, facilitar y brindar el aporte técnico y de uso de maquinaria para realizar las investigaciones del uso de fibra de abacá dentro de la matriz de plástico reciclado.

Al apoyo financiero brindado por la Vicerrectora de Investigación y Extensión (VIE), al Sistema de Posgrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el otorgamiento de una beca. A la Escuela de Química por las facilidades de los laboratorios y pruebas realizadas a través del Dr. Jesús Mora, con el apoyo del Dr. Luis Guillermo Romero y Sofia del CIPA. A la Escuela de Biología por las facilidades a través del M.Sc. Giovanni Garro, Ing. Luis Barboza, Ing. Karol Jiménez. A la Escuela de Agronomía por las facilidades a través del trabajo de la Ing. Ana Marlen Camacho. Muy especialmente al personal de la Escuela de Ingeniería Forestal y el Centro de Innovación Forestal por todo el apoyo administrativo desde los tiempos más difíciles de la pandemia hasta la finalización del proyecto, en particular el reconocimiento a los colegas Carlos Hernández y Carlos Ballesterero por el apoyo en las giras de campo, preparación de equipo y atención de los estudiantes asistentes. A la señora Viviana Hernández por la eficiencia y apoyo con las compras.

14 Referencias

Se incluyen en este apartado la bibliografía consultada en la formulación del proyecto. No se incluye la bibliografía actualizada que está incorporada en cada artículo publicado ni en los trabajos de graduación y las tesis.

Abonal, L. 2006. ABACA (FIBER) – PHILIPPINES. Luis R. Villafuerte and Apples of Gold Publishing. 295 p.

Aguilar, M.E.; Ortiz, J.L; Washington, J. 2011. Abacá: Particularidades de su cultivo y avances en técnicas de micro propagación en Costa Rica. Boletín MUSALAC. Vol 2 N° 1.

- Akhter, N., Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M., Nahar, K. 2009. Physiological response of garden pea (*Pisum sativum* L.) grown under different light environment. *Botany Research International* 2(4), 304-309.
- Allen, C.B., Will, R.E., McGarvey, R.C., Coyle, D.R., Coleman, M.D. 2004. Radiation-use efficiency and gas exchange responses to water and nutrient availability in irrigated and fertilized stands of sweetgum and sycamore. *Tree Physiology* 25, 191-200.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. 1998 *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements* Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300 p.
- American Society of Agronomy. 1982. *Method of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, LIM, CHIN HUAT -JACKSON, MARION. (Eds) American Society of Agronomy, Soil Science. Society of America, Madison. M. Second edition.
- Armezin, R.B., Cosico, W.C., Badayos, R.B. 2011. Characterization of the different abaca-based agro-ecosystems in Leyte, Philippines. *Journal of Natural Fibers* 8, 111-125.
- Armezin, R.B. 2008. Nutrient composition of abaca (*Musa textilis* Nee) at seedling, vegetative, and flagleaf stages of growth. *Journal of Natural Fibers* 5 (4), 331-346.
- Armezin, R.B., Gabon, F.M. 2008. Biomass, organic carbon and mineral matter contents of abaca (*Musa textilis* Nee) at different stages of growth. *Industrial Crops and Products* 28, 340-345.
- Balster, N.J., Marshall, J.D. 2000. Eight-year responses of light interception, effective leaf area index, and stemwood production in fertilized stands of interior Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*). *Can. J. For. Res.* 30, 733-743.
- Batugal, P.A., Tabora, P.Jr., Namuco, L.O., Sajise, J.U. 1977. Response of abaca to shading. *NSDB Tech Journal* 4(1), 61-64.
- Björkman, O., Holmgren, P. 1966. Photosynthetic adaptation to light intensity in plants native to shaded and exposed habitats. *Physiol. Plant.* 19, 854-889.
- Boardman, N.K., 1977. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 28, 355-377.
- Calvo-Alvarado, J.C.; Jiménez-Rodríguez, C; Carvajal-Vanegas, D; Arias-Aguilar, D. 2009. Rainfall interception in tropical forest ecosystems: Tree plantations and secondary forest. (on line). In *Water Resources in Changing Climates*. (2009, Virginia, US). *Proceedings of Water Research Conference*. Virginia US: Virginia Tech. p. 74-83. Accessed October 01, 2011. Available on <http://vwrrc.vt.edu/proceedings.html>
- Copeland, E.B., 1911. Abaca. *The Philipp Agricultrst Forester* 1, 70-78.

Dargantes, B.B., 1996. Socio-ecological Case Studies on Forest Lands Cultivation in Leyte, Philippines. Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany.

Department of Environment and Natural Resources (DENR). 1997. Sustainable livelihood options for the Philippines. Upland Ecosystem Information Kit.

Duriyaprapan, S., Britten, E.J. 1982. The effects of solar radiation on plant growth, oil yield and oil quality of Japanese mint. *Journal of Experimental Botany* 33(137), 1319-1324.

Evans, S. 2019. The “Age of Agricultural Ignorance”: Trends and Concerns for Agriculture Knee-Deep into the Twenty-First Century. *Agricultural History*, Vol. 93, No. 1 (Winter 2019), pp. 4-34.

Holmgren, P. 1968. Leaf factors affecting light-saturated photosynthesis in ecotypes of *Solidago virgaurea* from exposed and shaded habitats. *Physiol. Plant.* 21, 676-698.

Israeli, Y., Plaut, Z., Schwartz, A. 1994. Effect of shade on banana morphology, growth and production. *Scientia Horticulturae* 62, 45-56.

Jones, D. 2000. Diseases of banana, abaca and enset. Wallingford, UK, CABI Publishing. p. 30-31.

Kemanian, A.R., Stöckle, C.O. Huggins, D.R. 2004. Variability of barley radiation-use efficiency. *Crop Sci.* 44, 1662-1672.

Kumar N., V. Krishnamoorthy, L. Nalina & K. Soorianathasundharam. 2002. Nuevo factor para estimar el área foliar total en banano. *INFOMUSA* 11(2):42-43.

Lacuna-Richman, C. 2002. The role of abaca (*Musa textilis*) in the household economy of a forest village. *Small-scale forest economics, management and policy* 1(1), 93-101.

Netravali, A.; Chabba, S. 2003. Composites get greener. *Materials Today* 6(4):22-29. DOI: 10.1016/S1369-7021(03)00427-9.

Oladosu, OR; Jegede, OO.; Sunmonu LA. (2007) Bowen ratio estimation of surface energy fluxes in a humid tropical agricultural site, Ile-Ife, Nigeria. *Indian Journal of Radio & Space Physics* 36(3): 213–218.

Oficina Nacional Forestal. 2013. Guía Técnica SAF para la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. 31 p.

Pattison, T., Smith, L., Moody, P., Armour, J., Badcock, K., Cobon, J., Rasiah, V., Lindsay, S., Gulino, L. 2003. Banana root and soil health (BRASH) project, in: Turner, D.W., Rosales, F.E. (Eds.) *Banana root system: towards a better understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003*, pp. 149-165

Rodriguez, M.; Davidson-Hunt, I.; Berkes, F. 2019. Social–ecological memory and responses to biodiversity change in a Bribri Community of Costa Rica. *A Journal of the Human Environment*. P.1-12. DOI: 10.1007/s13280-019-01176-z.

Rohit, K; Dixit, S. 2016. Review - Future Aspect of Natural Fiber Reinforced Composite. *Polymers from Renewable Resources*, Vol. 7, No. 2. DOI: 10.1177/204124791600700202

Ramli, N.; Mazlan, N.; Ando, Y.; Leman, Z. ; Abdan, K.; Aziz, A. and Sairy, N. Natural fiber for green technology in automotive industry: A brief review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 368 (2018) 012012 DOI:10.1088/1757-899X/368/1/012012.

Raveh, E., Cohen, S., Raz, T., Yakir, D., Grava, A., Goldschmidt, E.E. 2003. Increased growth of young citrus trees under reduced radiation load in a semi-arid climate. *Journal of Experimental Botany* 54(81), 365-373.

Saifuddin, M., Hossain, A.M.B., Normaniza, O., 2010. Impacts of shading on flower formation and longevity, leaf chlorophyll and growth of *Bougainvillea glabra*. *Asian Journal of Plant Sciences* 9(1), 20-27.

Stanhill, G., Cohen, S. 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 255-278.

Stover, R.H. 1984. Canopy management in Valery and Grand Nain using leaf area index and photosynthetically active radiation measurements. *Fruits* 39, 89-93.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Bursting strength of paper. TAPPI 1963. (TAPPI T 403 ts-63).

Vijayalakshmi, K.; Neeraja, Ch.Y.K.; Kavitha, A.; Hayavadana, J. 2014. Abaca Fibre. *Transactions on Engineering and Sciences* Vol.2, Issue 9, September 2014.

Will, R.E., Baron G.A., Burkes, E.C., Shiver, B., Teskey, R.O. 2001. Relationship between intercepted radiation, net photosynthesis, respiration and rate of stem volume growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different densities. *For. Ecol. Manage.* 154, 155-163.

Yemele, M.; Koumba, A.; Cloutier, A.; Soulounganga, P.; Wolcott, M. 2010. Effect of bark content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41(1): 131-137.

15 Apéndice

Se incluyen las publicaciones generadas en el proyecto