

Revista Mexicana de Ciencias Forestales



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS FORESTALES

www.cienciasforestales.inifap.gob.mx

ISSN: 2007-1132

La **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** (antes *Ciencia Forestal* en México) es una publicación científica del sector forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Público de Investigación y Organismo Público Descentralizado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). Tiene como objetivo difundir los resultados de la investigación que realiza el propio Instituto, así como la comunidad científica nacional e internacional en el ámbito de los recursos forestales. El contenido de las contribuciones que conforman cada número es responsabilidad de los autores y su aceptación quedará a criterio del Comité Editorial, con base en los arbitrajes técnicos y de acuerdo a las normas editoriales. Se autoriza la reproducción de los trabajos si se otorga el debido crédito tanto a los autores como a la revista. Los nombres comerciales citados en las contribuciones, no implican patrocinio o recomendación a las empresas referidas, ni crítica a otros productos, herramientas o instrumentos similares.

Revista Mexicana de Ciencias Forestales está inscrita en el Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Es referida en el servicio de CABI Publishing (Forestry Abstracts y Forest Products Abstracts) de CAB International, así como en el Catálogo de Revistas del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América y El Caribe, España y Portugal (LATINDEX); en el Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (PERIÓDICA); en el Catálogo Hemerográfico de Revistas Latinoamericanas, Sección de Ciencias Exactas y Naturales (HELA), Sistema de Información Científica Redalyc y en la Scientific Electronic Library Online (SciELO-México).

La **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** Volumen 7, Número 38, noviembre-diciembre 2016, es una publicación bimestral editada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Av. Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina, delegación Coyoacán, C. P. 04010, Ciudad de México. www.inifap.gob.mx, cienciasforestales@inifap.gob.mx. Distribuida por el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid Comef). Editor Responsable: Marisela C. Zamora Martínez. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2010-012512434400-102. ISSN: 2007-1132, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (Indautor). Certificado de Licitud de Título y Licitud de Contenido: en trámite por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. El presente archivo digital PDF correspondiente al Volumen 7, Número 38 de la *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, es una versión íntegra y fiel de la impresa en noviembre de 2016 por: Graphx, S.A. de C.V. Tacuba 40 - 205 Col. Centro, C.P. 06010, deleg. Cuauhtémoc, Ciudad de México.



Portada: Larva de *Erinnyis ello* (Linnaeus).
Victor Javier Arriola Padilla

COMITÉ EDITORIAL

M.C. Marisela C. Zamora Martínez
EDITORA EN JEFE

Dra. Adriana Rosalía Gijón Hernández
EDITORA ADJUNTA

Dra. Cecilia Nieto de Pascual Pola
COORDINADORA EDITORIAL

CONSEJO CONSULTIVO INTERNACIONAL

Dr. Celedonio Aguirre Bravo
Forest Service, United States Department of Agriculture. Estados Unidos de América

Dra. Amelia Capote Rodríguez
Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical. La Habana, Cuba

Dr. Carlos Rodríguez Franco
Forest Service United States Research and Development. Estados Unidos de América

Ing. Martín Sánchez Acosta
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina

Dra. Laura K. Snook
International Plant Genetic Resources Institute. Roma, Italia

Dr. Santiago Vignote Peña
E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. España

CONSEJO CONSULTIVO NACIONAL

Dr. Miguel Caballero Deloya
Fundador de la Revista Ciencia Forestal en México

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón
Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Francisco Becerra Luna
Centro de Investigación Regional - Centro, INIFAP

Dra. Patricia Koleff Osorio
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

Ing. Francisco Javier Musálem López
Academia Nacional de Ciencias Forestales

M.C. Carlos Mallén Rivera
Ex-Editor en Jefe de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales

Dra. María Valdés Ramírez
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional

Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Especialidad Forestal, Colegio de Postgraduados

Dr. Hugo Ramírez Maldonado
División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo

Dr. Jorge Méndez González
Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Carlos Galindo Leal
Dirección de Comunicación Científica, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONTENIDO



EDITORIAL

Marisela Cristina Zamora Martínez



ENSAYO TÉCNICO

Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión

Chemistry of plant biomass upon yield during torrefaction: a review

Verónica Bustamante García, Artemio Carrillo Parra, José Ángel Prieto Ruíz, José Javier Corral-Rivas y José Ciro Hernández Díaz



ARTÍCULOS

Áreas naturales protegidas y sistema de uso común de recursos forestales en el Nevado de Toluca

Protected natural areas and common use system of forest resources in Nevado de Toluca

José Antonio De La Cruz Hernández, Víctor Ávila Akerberg, María Gladys Rivera Herrejón e Ivonne Vizcarra Bord



Selección de árboles semilleros de *Juglans pyriformis* Liebm. en poblaciones naturales de Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz

Juglans pyriformis Liebm. seed tree selection in natural populations of Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz

Eunice Ortiz Muñoz, Celia Cecilia Acosta Hernández, Pascual Linares Márquez, Zoylo Morales Romero y Virginia Rebolledo Camacho



Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino

Variation of carbon distribution between the root and the aerial part in three pine species

Jesús Morales Hernández, Mariela Gómez Romero, Crisanto Velázquez Becerra y Enrique Ambriz Parra



Histopatología de raíces de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. y de *Pinus pseudostrobus* Lindl. infectadas con *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922

Histopathology of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. and *Pinus pseudostrobus* Lindl. roots infected by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922

Santos Gerardo Leyva Mir, Nancy Patricia Nava García, Betsabé Diego Martínez, Alejandra Almaraz Sánchez, Silvia Mariel Hernández Villalobos y Juan Manuel Tovar Pedraza



Evaluación de las propiedades físicas de material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Physical properties of materials made of bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

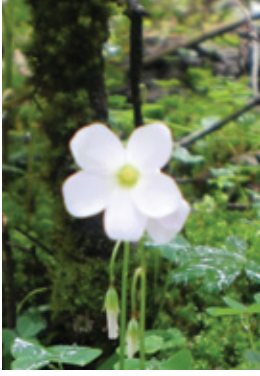
Karen Catherine Lázaro León, Héctor E. González Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa y Javier Gago Campusano



Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Mechanical properties of the composite material made with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Karen Catherine Lázaro León, Héctor E. González Mora y Aldo J. Cárdenas Oscanoa



Editorial

El número 38 cierra un año más de vida de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales, con estas líneas, a nombre de su Comité Editorial, expreso nuestro agradecimiento y reconocimiento al trabajo de los más de 50 especialistas de las áreas forestales y de recursos naturales, en general, por su apoyo en la revisión por pares de todos y cada uno de los manuscritos sometidos a la Revista. Sin duda sus comentarios y observaciones contribuyen a elevar la calidad de los contenidos que bimestralmente publicamos.

Asimismo, refrendamos nuestro compromiso con los autores, tanto del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) como de las diversas instituciones de investigación y enseñanza superior del país y extranjeras, de mantener en mejora continua los procesos editoriales y digitales que garanticen la calidad y visibilidad de los contenidos publicados en la Revista. Y con ello, contribuir a la difusión del conocimiento científico que se genera en nuestras instituciones en beneficio de las ciencias forestales, de los recursos naturales y de la sociedad en general.

El próximo año se vislumbra un periodo difícil, en cuanto a la disponibilidad de recursos para solventar el proceso editorial; sin embargo, el Comité Editorial tiene el compromiso de optimizar el presupuesto que se le asigne, así como los ingresos por la publicación de cada contribución, de tal manera que se mantenga la continuidad de la Revista; y, sobre todo, el avance hacia su mejor posicionamiento en el mundo de la edición científica, a través del cumplimiento de los indicadores internacionales de calidad, en lo que respecta a su política editorial.

Les reiteramos nuestro agradecimiento por considerar a la Revista Mexicana de Ciencias Forestales como un medio conveniente para la difusión de sus resultados de investigación, y esperamos seguir contando con dicha deferencia los años subsecuentes.

Marisela Cristina Zamora-Martínez
Editora en Jefe



Ensayo Técnico / Technical Essay

Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión

Chemistry of plant biomass upon yield during torrefaction: a review

Verónica Bustamante García¹, Artemio Carrillo Parra^{*2}, José Ángel Prieto Ruiz³,
José Javier Corral-Rivas² y José Ciro Hernández Díaz²

Resumen

La biomasa es una fuente de energía que presenta gran heterogeneidad estructural anatómica y química, con baja densidad energética, alto contenido de humedad e higroscopicidad, es hidrófila y con bajo poder calorífico. Para su aprovechamiento, la aplicación de tratamientos térmicos, conocidos como torrefacción promueven mayor eficiencia en la conversión a biocombustibles. En el presente trabajo se analizan la composición de la biomasa vegetal, su degradación térmica, rendimiento másico-energético y las propiedades químicas del producto final. Durante el proceso de torrefacción, se requiere de una atmósfera inerte e intervalos de temperatura de 200 a 300 °C. Este puede mejorar las características energéticas de la biomasa. Los productos sólidos, líquidos y gases obtenidos se emplean para generar energía calorífica. Los sólidos tienen menor contenido de oxígeno y humedad; lo que aumenta el poder calorífico, produce poco humo, no se fermenta, es hidrofóbico y resiste la pudrición. Los líquidos están conformados por agua, ácido acético, ácido furfural, ácido fórmico, metanol, ácido láctico, fenol, aldehídos y cetonas. Los gases generados son principalmente CO, CO₂, H₂ y CH₄. Finalmente, para caracterizar las propiedades y la calidad de los biocombustibles, se emplean técnicas de análisis proximales y elementales. El proceso de torrefacción mejora las propiedades químicas de la biomasa vegetal, al aumentar su calidad como combustible.

Palabras clave: Biocombustibles, bioenergía, densidad energética, pirólisis, poder calorífico, tratamiento térmico.

Abstract

Biomass is a source of energy that has great anatomical and chemical structural heterogeneity, low energy density, high moisture content and hygroscopicity, hydrophilic and with low calorific value. For their use, the application of thermal treatments, known as roasting, promote greater efficiency in the conversion to biofuels. In the present work the composition of the vegetal biomass, its thermal degradation, mass-energy yield and the chemical properties of the final product are analyzed. During the roasting process, an inert atmosphere and temperature intervals of 200 to 300 °C are required. This can improve the energy characteristics of the biomass. The solids, liquids and gases obtained are used to generate heat energy. Solids have lower oxygen and moisture content; Which increases the calorific value, produces little smoke, is not fermented, is hydrophobic and resists rotting. The liquids are made up of water, acetic acid, furfural acid, formic acid, methanol, lactic acid, phenol, aldehydes and ketones. The gases generated are mainly CO, CO₂, H₂ and CH₄. Finally, to characterize the properties and quality of biofuels, techniques of proximal and elemental analysis are used. The roasting process improves the chemical properties of vegetable biomass by increasing its quality as a fuel.

Key words: Biofuels, bioenergy, energy density, pyrolysis, calorific value, heat treatment.

Fecha de recepción/Reception date: 6 de noviembre de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de diciembre de 2016.

¹ Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

² Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. México. Correo-e: acarrilloparra@ujed.mx

³ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

*Autor por correspondencia

Introducción

En los últimos años, el mayor reto ha sido lograr un equilibrio entre el desarrollo económico y la calidad del ambiente (REN21, 2016). La principal causa del deterioro ambiental es la demanda creciente de energía, provocada por los modelos económicos que imperan y el incremento significativo de los requerimientos de iluminación, calefacción, refrigeración y transporte (Demirbas, 2005). Después de la crisis del petróleo de 1973, se hizo evidente la importancia de diversificar las fuentes de combustibles y tecnologías respetuosas del ambiente (Maffeo, 2003).

El avance actual en el uso de energías renovables y eficiencia energética juegan un papel crucial en la reducción del consumo de combustibles fósiles, gases de efecto invernadero y la contaminación ambiental. En el 2014, la producción de energías renovables representó cerca de 58.5 % de la capacidad mundial de generación energética. En el 2016, China fue el líder en la capacidad instalada sobre el particular, con 83.3 billones de dólares (REN21, 2016). Las energías renovables que más se consumen y comercializan a nivel mundial, según su nivel de importancia, son: la eólica (51 %), la geotérmica (17 %), la bioenergía (12 %), la hidroeléctrica (10 %) y la solar (1.1 %) (Alemán-Nava *et al.*, 2014).

La biomasa, una fuente de energía renovable, es todo tipo de materia orgánica que tiene origen en un proceso biológico (Kumar *et al.*, 2015). En las plantas, durante la fotosíntesis (proceso de óxido reducción) se absorbe la energía solar en la clorofila y se transforma el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos que almacenan energía química, mediante el proceso de conversión fotoelectroquímica de la fotosíntesis (Bustamante-García *et al.*, 2013). Los carbohidratos se componen, principalmente, de hidratos de carbono, lípidos y proteínas, los cuales están en una proporción variable, en función de la naturaleza de la biomasa.

Desafortunadamente, el uso de la biomasa como combustible presenta desventajas por su heterogeneidad en la estructura anatómica, física y química. Desde el punto de vista físico se caracteriza por tener alto contenido de humedad, baja densidad, gran volumen, amplia higroscopicidad, dificultad de almacenamiento y alta tenacidad (Zheng *et al.*, 2013). La composición química incluye mayores fracciones de hidrógeno, oxígeno y volátiles, así como menores cantidades de carbono y poder calorífico, en comparación con los combustibles fósiles.

Los inconvenientes de la biomasa como fuente de energía se pueden mejorar con pretratamientos termoquímicos (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012; Chen y Kuo, 2011; Arteaga-Pérez *et al.*, 2015). Según Rousset *et al.* (2013), los principales métodos utilizados para transformar la biomasa en energía son: biológicos (digestión anaeróbica, fermentación), químicos (esterificación), mecánicos (densificado y reducción gravimétrica)

Introduction

In recent years, the greatest challenge has been to achieve a balance between economic development and the quality of the environment (REN21, 2016). The main cause of the environmental deterioration is the increasing demand for energy, caused by the prevailing economic models and the significant increase in lighting, heating, cooling and transportation requirements (Demirbas, 2005). After the 1973 oil crisis, the importance of diversifying sources of fuel and environmentally friendly technologies became evident (Maffeo, 2003).

Current progress in the use of renewable energy and energy efficiency plays a crucial role in reducing the consumption of fossil fuels, greenhouse gases and environmental pollution. In 2014, the production of renewable energies represented about 58.5 % of the global capacity of energy generation. In 2016, China was the leader in the installed capacity on the matter, with 83.3 billion dollars (REN21, 2016). Renewable energies that are most consumed and traded globally, according to their level of importance are: wind (51 %), geothermal (17 %), bioenergy (12 %), hydroelectric (10 %) and Solar (1.1 %) (Alemán-Nava *et al.*, 2014).

Biomass, a source of renewable energy, is all kinds of organic matter that originates in a biological process (Kumar *et al.*, 2015). In plants, during photosynthesis (reduction oxide process) solar energy is absorbed in chlorophyll and carbon dioxide (CO₂) is transformed from air and soil water into carbohydrates that store chemical energy, through the photoelectrochemistry conversion process of photosynthesis (Bustamante-García *et al.*, 2013). Carbohydrates are composed mainly of carbohydrates, lipids and proteins, which are in a variable proportion, depending on the nature of the biomass.

Unfortunately, the use of biomass as fuel has disadvantages because of its heterogeneity in anatomical, physical and chemical structure. From the physical point of view, it is characterized by high moisture content, low density, high volume, high hygroscopicity, storage difficulty and high toughness (Zheng *et al.*, 2013). The chemical composition includes larger fractions of hydrogen, oxygen and volatiles, as well as lower amounts of carbon and calorific value compared to fossil fuels.

The disadvantages of biomass as an energy source can be improved with thermochemical pre-treatments (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012; Chen y Kuo, 2011; Arteaga-Pérez *et al.*, 2015). According to Rousset *et al.* (2013) the main methods used to transform biomass into energy are biological (aerobic digestion, fermentation), chemical (esterification), mechanical (densified and gravimetric reduction) and thermochemical (combustion, liquefaction, gasification, pyrolysis and torrefaction processes). Most of these help to break the amorphous and crystalline regions of the biomass (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012).

y termoquímicos (combustión, licuefacción, gasificación, pirólisis y torrefacción). La mayoría de estos ayudan a romper las regiones amorfas y cristalinas de la biomasa (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012).

La torrefacción es una pirólisis lenta que mejora las propiedades de la biomasa lignocelulósica para convertirla en combustible de buena calidad. Consiste en un calentamiento lento de la biomasa en una atmósfera inerte (ausencia de oxígeno), a una temperatura que varía de 200 a 300 °C (Chen *et al.*, 2015), durante un tiempo de residencia por algunos minutos hasta una hora (Rousset *et al.*, 2013). Las mejoras que se observan después de la torrefacción son reducción del contenido de humedad, aumento de la densidad energética, incremento de la relación C/O, mejora de la hidrofobicidad, la inflamabilidad, reactividad y molienda; se facilita el almacenamiento y transporte (Couhert *et al.*, 2009).

Con base en lo anterior, el objetivo de este documento es realizar una revisión bibliográfica detallada sobre la torrefacción de la biomasa, que incluye: a) composición química de la biomasa, b) degradación térmica, c) productos de la torrefacción, d) rendimiento másico, e) rendimiento energético, y f) propiedades químicas del combustible. La finalidad es proporcionar información reciente sobre dicho proceso, que se considera que en el futuro será una de las principales tecnologías para obtener combustibles con alto valor energético, a partir de biomasa vegetal.

Composición química de la biomasa vegetal

La unidad estructural de todo organismo vegetal es la célula, la cual está compuesta de una pared celular que es una capa resistente, pero generalmente flexible, aunque en ocasiones es rígida y proporciona soporte estructural a las plantas. Además, le da protección a las tensiones mecánicas y térmicas. Sus principales constituyentes son hemicelulosa, celulosa, lignina y componentes extraíbles (Montoya-Arbeláez *et al.* 2014).

Hemicelulosa. Es un polímero complejo, compuesto de grupos heterogéneos de polisacáridos como: pentosas (D-xilosa y L-arabinosa) y hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) que forman cadenas lineales ramificadas; y los ácidos 4-O-metilglucurónico, D-galacturónico y D-glucurónico con enlaces β -1, 3 (Sun y Tomkinson, 2003; Scheller y Ulvskov, 2010). Se estructura en cadenas de 500-3 000 unidades de azúcar es responsable de aproximadamente 15 a 35 % del peso seco de la madera de latifoliadas y de 20 a 32 % de las coníferas (Cuadro 1).

Roasting is a slow pyrolysis that improves the properties of lignocellulosic biomass to convert it into good quality fuel. It consists of a slow heating of the biomass in an inert atmosphere (absence of oxygen), at a temperature ranging from 200 to 300 °C (Chen *et al.*, 2015), during a residence time from a few minutes to one hour (Rousset *et al.*, 2013). The improvements observed after torrefaction are reducing the moisture content, increasing the energy density, increasing the C / O ratio, improving hydrophobicity, flammability, reactivity and grinding; Storage and transport are facilitated (Couhert *et al.*, 2009).

Based on the above, the objective of this document is to carry out a detailed bibliographic review on the roasting of the biomass, which includes: a) chemical composition of the biomass, b) thermal degradation, c) roasting products, d) mass efficiency, e) energy efficiency, and f) chemical properties of the fuel. The purpose is to provide recent information about this process, which is considered in the future will be one of the main technologies to obtain fuels with high energy value from vegetable biomass.

Chemical composition of plant biomass

The structural unit of every plant organism is the cell, which is composed of a cell wall which is a resistant but generally flexible layer, although it is sometimes rigid and provides structural support to plants. In addition, it gives protection to mechanical and thermal stresses. Its main constituents are hemicellulose, cellulose, lignin and extractable components (Montoya-Arbeláez *et al.*, 2014).

Hemicellulose. It is a complex polymer composed of heterogeneous polysaccharide groups such as pentoses (D-xylose and L-arabinose) and hexoses (D-glucose, D-mannose and D-galactose) forming branched chain chains; And 4-O-methylglucuronic, D-galacturonic and D-glucuronic acids with β -1,3 links (Sun and Tomkinson, 2003; Scheller and Ulvskov, 2010). Its structures in chains of 500-3 000 units of sugar is responsible for approximately 15 to 35 % of the dry weight of broadleaf wood and 20 to 32 % of conifers (Table 1).



Cuadro 1. Composición química de diferentes tipos de biomasa vegetal.

Biomasa	Hemicelulosa (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Extractivos (%)
Cáscara de arroz ¹	18.47	42.20	19.40	-
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	14.44	62.33	13.01	2.52
Madera de <i>Fagus</i> ssp. ³	34.40	40.90	24.80	-
Paja ⁴	27.20	34.00	14.20	-
Madera de <i>Betula pendula</i> Roth ⁴	25.70	40.00	15.70	-
<i>Salix</i> spp. ⁵	14.10	49.30	20.00	-
Cáscara de coco ⁶	28.40	52.20	36.00	-
<i>Betula pendula</i> Roth ⁷	27.70	40.00	15.70	-
Latifoliadas ⁸	15-35	40-44	18-25	-
Coníferas ⁸	20-32	40-44	25-35	-
<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L. f.) D. Don ⁹	7.65	46.86	42.11	-
<i>Abies alba</i> Mill. ¹⁰	25.00	37.10	35.00	2.80
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst ¹⁰	20.00	42.40	35.10	2.40

Fuente: ¹ = Abdullah *et al.* (2010); ² = Chen *et al.* (2015a); ³ = Septien *et al.* (2012); ⁴ = Mohan *et al.* (2006); ⁵ = Bridgeman *et al.* (2008); ⁶ = Montoya-Arbeláez *et al.* (2014); ⁷ = Shankar-Tumuluru *et al.* (2011); ⁸ = Shah y Gardner (2012); ⁹ = Lu *et al.* (2013); ¹⁰ = Peng *et al.* (2013).

Table 1. Chemical composition of different types of plant biomass.

Biomass	Hemicellulose (%)	Cellulose (%)	Lignin (%)	Extractives (%)
Rice shell	18.47	42.20	19.40	-
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	14.44	62.33	13.01	2.52
<i>Fagus</i> ssp. wood ³	34.40	40.90	24.80	-
Straw ⁴	27.20	34.00	14.20	-
<i>Betula pendula</i> Roth wood ⁴	25.70	40.00	15.70	-
<i>Salix</i> spp. ⁵	14.10	49.30	20.00	-
Cocconut shell ⁶	28.40	52.20	36.00	-
<i>Betula pendula</i> Roth ⁷	27.70	40.00	15.70	-
Broadleaves ⁸	15-35	40-44	18-25	-
Conifers ⁸	20-32	40-44	25-35	-
<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L. f.) D. Don ⁹	7.65	46.86	42.11	-
<i>Abies alba</i> Mill. ¹⁰	25.00	37.10	35.00	2.80
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst ¹⁰	20.00	42.40	35.10	2.40

Source: ¹ = Abdullah *et al.* (2010); ² = Chen *et al.* (2015a); ³ = Septien *et al.* (2012); ⁴ = Mohan *et al.* (2006); ⁵ = Bridgeman *et al.* (2008); ⁶ = Montoya-Arbeláez *et al.* (2014); ⁷ = Shankar-Tumuluru *et al.* (2011); ⁸ = Shah and Gardner (2012); ⁹ = Lu *et al.* (2013); ¹⁰ = Peng *et al.* (2013).



La degradación térmica de la hemicelulosa en la torrefacción ocurre en el intervalo de temperaturas de 130 a 260 °C; la mayor pérdida en peso se produce por encima de los 180 °C (Mohan *et al.*, 2006), debido a su composición química y su relación con la lignina (Demirbas, 2009). En el Cuadro 1 se observa el porcentaje de hemicelulosa en diferentes tipos de biomasa, cuyos valores después de someterla a torrefacción, varían de 7.0 a 34.4 %. La biomasa agrícola es diferente a la leñosa, ya que los cultivos tienen un alto contenido de hemicelulosa, que se descompone fácilmente cuando se calienta (Wang *et al.*, 2011). Rowell (2012) indica que la hemicelulosa se origina de grupos acetilo y metilo, los cuales son responsables de la liberación de gases volátiles ligeros (CO y CO₂), durante un tratamiento térmico a temperaturas de 200 a 300 °C. Scheller y Ulvskov (2010) señalan que la proporción de alquitranes y carbón es menor que los obtenidos de la torrefacción de la celulosa.

Celulosa. Es el principal componente de la biomasa celulósica (almidones) y lignocelulósica (bagazo, hojas, frutos, etcétera); constituye entre 40 y 60 % del contenido de la pared celular de la madera de latifoliadas y coníferas (Cuadro 1). Es un polímero de alto peso molecular que forma las fibras de la biomasa; tiene una estructura de 7 000 a 15 000 moléculas de glucosa (Basu *et al.*, 2013). El polímero de D-glucosas está unido por enlaces glucosídicos β- (1 → 4), para formar moléculas de celobiosa (Nhuchhen *et al.*, 2014). Se forma por una estructura de largas cadenas lineales (microfibrillas) unidas por puentes de hidrógeno con el oxígeno y fuerzas de van der Waals intramoleculares, que desarrolla una estructura fibrilar cristalina y una amorfa (Cuervo *et al.*, 2009).

La región cristalina es difícil de penetrar por disolventes y reactivos; además, es más resistente a la despolimerización térmica (Sjöström, 1993). La amorfa contiene agua de hidratación y mantiene agua libre dentro de la planta, es más accesible y susceptible a todas las reacciones; cuando se calienta, rápidamente, esta se convierte en vapor que puede romper la estructura de la celulosa (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2011). Por lo tanto, de acuerdo al tipo de biomasa su contenido de celulosa después de la torrefacción varía de 34.00 a 62.33 % (Cuadro 1).

La celulosa es importante porque favorece la rigidez en las células vegetales, debido a la unión de las microfibrillas en una matriz de hidratos de carbono. Los grupos hidroxilos incrementan la capacidad de formar enlaces de hidrógeno y son responsables de su comportamiento higroscópico e influyen en el hinchamiento y contracción de la biomasa al absorber o perder humedad (Nhuchhen *et al.*, 2014); por lo tanto, al someterla a un tratamiento térmico, ocurren fenómenos de contracción que provocan variaciones dimensionales (Nhuchhen *et al.*, 2014). La degradación térmica de la celulosa comienza entre los 240 y 350 °C, lo que hace que se transforme en celulosa anhidro y levoglucosano (Mohan *et al.*, 2006).

The thermal degradation of hemicellulose in the torrefaction occurs in the temperature range of 130 to 260 °C; the highest weight loss occurs above 180 °C (Mohan *et al.*, 2006), due to its chemical composition and its relationship with lignin (Demirbas, 2009). Table 1 shows the percentage of hemicellulose in different types of biomass, whose values after roasting vary from 7.0 to 34.4 %. Agricultural biomass is different from woody biomass, since crops have a high hemicellulose content, which decomposes easily when heated (Wang *et al.*, 2011). Rowell (2012) indicates that hemicellulose originates from acetyl and methyl groups, which are responsible for the release of light volatile gases (CO and CO₂) during a temperature thermal treatment between 200 and 300 °C. Scheller and Ulvskov (2010), indicate that the proportion of tar and coal is lower than those obtained from the torrefaction of cellulose.

Cellulose. It is the main component of the cellulosic biomass (starches) and lignocellulosic (bagasse, leaves, fruits, etc.), constitutes between 40 and 60 % of the cell wall content of broadleaved and coniferous wood (Table 1). It is a high molecular weight polymer that forms the fibers of the biomass; it has a structure of 7 000 to 15 000 glucose molecules (Basu *et al.*, 2013). The D-glucose polymer is linked by β- (1→4) glycosidic bonds to form cellobiose molecules (Nhuchhen *et al.*, 2014). It is formed by a structure of long linear chains (microfibrils) joined by hydrogen bridges with oxygen and intramolecular van der Waals forces, which develops a crystalline and amorphous fibrillar structure (Cuervo *et al.*, 2009).

The crystalline region is difficult to penetrate by solvents and reagents; moreover, it is more resistant to thermal depolymerization (Sjöström, 1993). The amorphous one contains water of hydration and maintains free water inside the plant, it is more accessible and susceptible to all reactions; when it is rapidly heated, it becomes steam that can break down the structure of cellulose (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2011). Therefore, according to the type of biomass its cellulose content after torrefaction varied from 34.00 to 62.33 % (Table 1).

Cellulose is important because it favors stiffness in plant cells, due to the union of the microfibrils in a carbohydrate matrix. Hydroxyl groups increase the ability to form hydrogen bonds and are responsible for their hygroscopic behavior and influence the swelling and contraction of the biomass by absorbing or losing moisture; (Nhuchhen *et al.*, 2014). In order to obtain a thermal treatment, there are contraction phenomena that cause dimensional variations (Nhuchhen *et al.*, 2014). The thermal degradation of the cellulose begins between 240 and 350 °C, which transforms it into anhydrous cellulose and levoglucosan (Mohan *et al.*, 2006).

Lignin. It is a non-crystalline, amorphous, three-dimensional and branched polymer with a structural base of phenylpropane units (C₁₀H₁₅O₃)_n, with a large number of aromatic rings joined

Lignina. Es un polímero no cristalino, amorfo, tridimensional y ramificado con base estructural de unidades fenil-propano ($(C_{10}H_{15}O_3)_n$), con un gran número de ciclos aromáticos unidos entre ellos por ciclos de furano o enlaces éter (β -O-4-aryl) (Vanholme *et al.*, 2010). Se forma de la unión de varios ácidos, alcoholes fenilpropílicos y múltiples azúcares; se origina en la pared celular de muchas células vegetales, su contenido oscila entre 18 y 25 % en madera de latifoliadas y de 25 a 35 % en la de coníferas (Cuadro 1).

La lignina se localiza, principalmente, en la lámina media, donde se deposita durante la lignificación del tejido vegetal; cubre los espacios en la pared celular entre los componentes de celulosa, hemicelulosa y pectina (Brebú y Vasile, 2010). Por su naturaleza es hidrófoba y aromática; permite el transporte de agua, nutrientes y metabolitos; a su vez, proporciona dureza, rigidez y resistencia a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, y se le considera un pegamento, ya que une por unir células adyacentes (Bergman *et al.*, 2005a).

La estructura de la lignina tiene diversas estabildades térmicas; por lo tanto, se rompe a diferentes temperaturas (Brebú y Vasile, 2010). Según Yang *et al.* (2007), se descompone a un intervalo amplio de temperaturas, que varían de 280 a 900 °C, debido a los diferentes grupos funcionales que la componen y la completa desvolatilización de la madera. Shah y Gardner (2012) registran que, a temperaturas de 250 a 500 °C, la lignina es el elemento estructural más difícil de descomponer térmicamente. La producción de fenoles se realiza mediante la división de enlaces éter y enlaces carbono-carbono (Demirbas, 2009; Mohan *et al.*, 2006).

Componentes extraíbles. La desvolatilización depende de la cantidad y ubicación de los extraíbles en la biomasa. Estos compuestos se dividen en componentes orgánicos e inorgánicos (minerales). Los orgánicos son responsables de las características de la biomasa, como el color, olor, gusto, densidad, higroscopicidad e inflamabilidad (Mohan *et al.*, 2006). Son compuestos solubles en diferentes solventes, como el alcohol benceno que solubiliza ceras, grasas y resinas; en agua fría se solubilizan los taninos, gomas, azúcares y materiales colorantes, mientras que en agua caliente los almidones. Se clasifican en ácidos volátiles, aceites esenciales, ácidos resinosos y polifenoles (Lima, 2013).

Los componentes inorgánicos (minerales) presentan algunos iones metálicos, esenciales para el óptimo desarrollo del árbol, su contenido varía de 2.5 a 12.0 % del peso de la biomasa. Altos contenidos de minerales se encuentran en las hojas, ramas, corteza, raíces; su cantidad es influenciada por las condiciones del suelo y edad (Mohan *et al.*, 2006). Los componentes más abundantes son el calcio, potasio y magnesio, en menor proporción fósforo, sodio, hierro, silicio, manganeso, cobre y zinc (Kim *et al.*, 2012).

together by cycles of furan or ether bonds (β -O-4-aryl) (Vanholme *et al.*, 2010). It is formed from the union of various acids, phenylpropyl alcohols and multiple sugars; it originates in the cell wall of many plant cells, its content ranges from 18 to 25 % in hardwood and 25 to 35 % in coniferous wood (Table 1).

Lignin is mainly located in the middle sheet, where it is deposited during the lignification of the plant tissue; it covers the spaces in the cell wall between the components of cellulose, hemicellulose and pectin (Brebú and Vasile, 2010). By its nature it is hydrophobic and aromatic; it allows water, nutrients and metabolites transport; in turn, provides hardness, stiffness and resistance to the cell wall and acts as a bridge between the cells of the wood, and is considered a glue, since it unites by joining adjacent cells (Bergman *et al.*, 2005a).

The structure of lignin has various thermal stabilities; therefore, it breaks at different temperatures (Brebú and Vasile, 2010). According to Yang *et al.* (2007), it decomposes to a wide range of temperatures, ranging from 280 to 900 °C, due to the different functional groups that compose it and complete devolatilization of the wood. Shah and Gardner (2012) report that, at temperatures of 250-500 °C, lignin is the most difficult structural element to decompose thermally. Phenols are produced by the separation of ether bonds and carbon-carbon bonds (Demirbas, 2009; Mohan *et al.*, 2006).

Extractable components. Devolatilization depends on the amount and location of the extractables in the biomass. These compounds are divided into organic and inorganic (mineral) components. Organic matter is responsible for the biomass characteristics, such as color, odor, taste, density, hygroscopicity and flammability (Mohan *et al.*, 2006). They are soluble compounds in different solvents, like benzene alcohol that solubilizes waxes, fats and resins; In cold water the tannins, gums, sugars and coloring materials are solubilized, while in warm water the starches. They are classified as volatile acids, essential oils, resin acids and polyphenols (Lima, 2013).

The inorganic (mineral) components present some metallic ions, essential for the optimum development of the tree, its content varies from 2.5 to 12.0 % of the weight of the biomass. High mineral contents are found in leaves, branches, bark, roots; Their quantity is influenced by soil and age conditions (Mohan *et al.*, 2006). The most abundant components are calcium, potassium and magnesium, to a lesser extent phosphorus, sodium, iron, silicon, manganese, copper and zinc (Kim *et al.*, 2012).

Torrefaction Products

In the torrefaction process different products are obtained: uniform solids, condensable organic compounds (liquids) and non-condensable gases (van der Stelt *et al.*, 2011). Bergman *et al.* (2005b) state that the quantity and type of products

Productos de la torrefacción

En el proceso de torrefacción se obtienen diferentes productos: sólidos uniformes, compuestos orgánicos condensables (líquidos) y gases no condensables (van der Stelt *et al.*, 2011). Bergman *et al.* (2005b), afirman que la cantidad y tipo de productos generados dependen de las condiciones operativas como la velocidad de calentamiento, la temperatura y el tiempo de residencia, así como de las propiedades físicas, anatómicas y químicas de la biomasa.

Productos sólidos. La producción de sólidos o también conocida como rendimiento másico, se define como la relación del peso seco de la biomasa sin tratar y el peso del producto sólido seco libre de cenizas (Basu *et al.*, 2013). La descomposición térmica de la hemicelulosa, celulosa y lignina influye, ampliamente, en la pérdida de masa de los materiales lignocelulósicos. Chew y Doshi (2011), a partir de un análisis espectrométrico de masas, documentan que la pérdida de peso de la biomasa se debe a la reducción de la hemicelulosa y de lignina (Na *et al.*, 2013).

Wang *et al.* (2011) observaron que al aumentar la temperatura en la torrefacción de tallos de *Gossypium herbaceum* L. y *Triticum aestivum* L. disminuye el rendimiento másico o de sólidos, pero aumentan las fracciones volátiles. En el Cuadro 2 se indica que el rendimiento de sólidos varía por el tipo de biomasa y la temperatura máxima que alcanza el proceso de torrefacción, ya que conforme se incrementa la temperatura disminuye el rendimiento. En general, el rendimiento másico después del proceso presenta un alto contenido de carbono y alta densidad energética. Shankar-Tumuluru *et al.* (2011) señalan que la fase sólida varía de color marrón a negro y puede utilizarse para bioenergía, ya que está compuesta por una estructura de azúcares, productos originados de la reacción, carbón y cenizas (Bergman *et al.*, 2005b).

generated depends on operating conditions such as heating rate, temperature and residence time, as well as the physical, anatomical and chemical properties of the biomass.

Solid products. The production of solids or also known as mass yield is defined as the dry weight ratio of the untreated biomass and the weight of the ash-free dry solid product (Basu *et al.*, 2013). The thermal decomposition of hemicellulose, cellulose and lignin has a large influence on the loss of mass of the lignocellulosic materials. Chew and Doshi (2011), based on a mass spectrometric analysis, document that the weight loss of biomass is due to the reduction of hemicellulose and lignin (Na *et al.*, 2013).

Wang *et al.* (2011) observed that increasing the temperature in the torrefaction of stems of *Gossypium herbaceum* L. and *Triticum aestivum* L. decreases the mass or solids yield, but increases the volatile fractions. Table 2 shows that the solids yield varies by the type of biomass and the maximum temperature reached by the torrefaction process, as the temperature increases yield decreases. In general, the post-process mass yield has a high carbon content and high energy density. Shankar-Tumuluru *et al.* (2011) indicate that the solid phase varies from brown to black and can be used for bioenergy, since it is composed of a structure of sugars, products originating from the reaction, coal and ash (Bergman *et al.*, 2005b).



Cuadro 2. Rendimiento de los productos obtenidos de la torrefacción en función de la temperatura y biomasa.

Biomasa	Temperatura (%)	Rendimiento másico (peso seco %)	Rendimiento líquido (peso seco %)	Rendimiento gaseoso (peso seco %)
Tallo de <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	200	63.89	4.14	31.97
Tallo de <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	250	33.80	13.80	52.40
Tallo de <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	300	30.04	17.28	52.68
Tallo de <i>Triticum aestivum</i> L. ²	200	47.56	3.93	48.51
Tallo de <i>Triticum aestivum</i> L. ²	250	42.24	9.69	49.07
Tallo de <i>Triticum aestivum</i> L. ²	300	31.61	11.57	56.82
<i>Salix</i> ssp. ³	280	87.50	1.40	1.40
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	230	91.00	8.00	1.00
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	250	85.50	13.00	1.50
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	280	79.00	18.00	3.00

Continúa Cuadro 2..

Continúa Cuadro 2...

Biomasa	Temperatura (%)	Rendimiento másico (peso seco %)	Rendimiento líquido (peso seco %)	Rendimiento gaseoso (peso seco %)
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	230	93.20	6.00	0.80
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	250	88.00	10.80	1.20
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	280	79.00	19.00	2.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	230	89.00	10.00	1.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	250	83.00	15.00	3.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	280	69.00	24.00	7.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	250	74.00	8.00	18.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	300	46.00	25.00	30.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	350	36.00	27.00	37.00

Fuente: ¹ = Wang et al. (2011); ² = Wang et al. (2011); ³ = Shankar-Tumuluru et al. (2011); ⁴ = Zanzi et al. (1989); ⁵ = Chen et al. (2015).

Table 2. Yield of products obtained from torrefaction as a function of temperature and biomass.

Biomass	Temperature (%)	Mass yield (dry weight %)	Liquid yield (dry weight %)	Gas yield (dry weight %)
Stem of <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	200	63.89	4.14	31.97
Stem of <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	250	33.80	13.80	52.40
Stem of <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	300	30.04	17.28	52.68
Stem of <i>Triticum aestivum</i> L. ²	200	47.56	3.93	48.51
Stem of <i>Triticum aestivum</i> L. ²	250	42.24	9.69	49.07
Stem of <i>Triticum aestivum</i> L. ²	300	31.61	11.57	56.82
<i>Salix</i> sp. ³	280	87.50	1.40	1.40
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	230	91.00	8.00	1.00
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	250	85.50	13.00	1.50
<i>Salix babylonica</i> L. ⁴	280	79.00	18.00	3.00
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	230	93.20	6.00	0.80
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	250	88.00	10.80	1.20
<i>Betula pendula</i> Roth ⁴	280	79.00	19.00	2.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	230	89.00	10.00	1.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	250	83.00	15.00	3.00
<i>Miscanthus</i> spp. ⁴	280	69.00	24.00	7.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	250	74.00	8.00	18.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	300	46.00	25.00	30.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ⁵	350	36.00	27.00	37.00

Source: ¹ = Wang et al. (2011); ² = Wang et al. (2011); ³ = Shankar-Tumuluru et al. (2011); ⁴ = Zanzi et al. (1989); ⁵ = Chen et al. (2015).



Li *et al.* (2012) consignan que en la torrefacción es mayor el rendimiento másico que en la carbonización, al obtener gran parte de biochar (70-85 % en peso), el cual es factible usarlo como fertilizante, combustible en las industrias termoeléctrica y metalúrgica, y para la elaboración de productos químicos.

Bergman y Kiel (2005) indican que después de la torrefacción de la madera de *Salix* spp. a 280 °C, el rendimiento másico es de 87.5 %. Bergman *et al.* (2005a) lo calcularon en 70 %, mientras que el 30 % restante de la masa se convierte en gases. Almeida *et al.* (2010) mostraron que dicho producto es posible utilizarlo como un indicador cuantitativo para medir el grado de torrefacción.

Compuestos condensables (líquidos)

Conforme aumenta la temperatura en el proceso de torrefacción, mayor es la liberación de gases condensables (compuestos líquidos) y no condensables (gases), debido a la competencia entre la carbonización y las reacciones de desvolatilización (Cuadro 3). Según van der Stelt *et al.* (2011), los productos líquidos se dividen en cuatro subgrupos: 1) agua de reacción producida a partir de la descomposición térmica; 2) agua libre que se obtiene de la evaporación; 3) compuestos orgánicos y lípidos producidos durante la desvolatilización y la carbonización; y 4) compuestos como ceras y ácidos grasos. En cambio, Shankar-Tumuluru *et al.* (2011) citan indican que los productos líquidos comprenden agua, ácido acético, ácido furfural, ácido fórmico, metanol, ácido láctico, fenol, aldehídos y cetonas.

El agua es el principal producto condensable de la torrefacción, que se libera durante el secado cuando la humedad se evapora y en las reacciones de deshidratación entre las moléculas orgánicas. El ácido acético se origina, principalmente, a partir de los grupos metoxi presentes como cadenas laterales en unidades de xilosa (parte de la fracción de hemicelulosa) y acetoxi (Shah and Gardner, 2012).

Compuestos no condensables (gases)

El tipo y la cantidad de gas liberado durante la torrefacción dependen del tipo de materia prima, composición anatómica, molecular y química. Yang *et al.* (2007) registran que los principales gases que se forman durante la torrefacción, son el H₂, CO y CO₂ (Cuadro 3). La hemicelulosa con más contenido de grupos funcionales carboxilo presentó mayor rendimiento de CO₂. La celulosa tiene alto rendimiento de CO, debido a la degradación térmica del carbonilo y carboxilo. La lignina tiene el rendimiento más alto de H₂ y CH₄, lo cual es atribuible al alto contenido de anillos aromáticos y a los grupos metoxilos (O-CH₃), responde al agrietamiento y la deformación del compuesto, lo que origina una gran liberación de H₂ y CH₄.

Li *et al.* (2012) state that in torrefaction the mass yield is greater than in carbonization, by obtaining a large part of biochar (70-85 % by weight), which is feasible to use as fertilizer, fuel in the thermoelectric and metallurgical industries and for the manufacture of chemicals.

Bergman and Kiel (2005) indicate that after the torrefaction of the wood of *Salix* spp. at 280 °C, the mass yield is 87.5 %. Bergman *et al.* (2005a) made a calculation of 70 %, while the remainder (30 %) of the mass is converted into gases. Almeida *et al.* (2010) showed that this product can be used as a quantitative indicator to measure the degree of torrefaction.

Condensable compounds (liquids)

As the temperature increases in the torrefaction process, the higher the release of condensable gases (liquid compounds) and non-condensable (gases), due to competition between carbonization and devolatilization reactions (Table 3). According to Van der Stelt *et al.* (2011), the liquid products are divided into four subgroups: 1) reaction water produced from the thermal decomposition; 2) free water obtained from evaporation; 3) organic compounds and lipids produced during devolatilization and carbonization; and 4) compounds such as waxes and fatty acids. In contrast, Shankar-Tumuluru *et al.* (2011) cite that liquid products comprise water, acetic acid, furfural acid, formic acid, methanol, lactic acid, phenol, aldehydes and ketones.

Water is the main condensable product of torrefaction, and it is released during drying when moisture evaporates and in the dehydration reactions between organic molecules. Acetic acid originates mainly from the methoxy groups present as side chains in units of xylose (part of the hemicellulose fraction) and acetoxi (Shah and Gardner, 2012).

Non-condensable compounds (gases)

The type and amount of gas released during torrefaction depend on the type of raw material, anatomical, molecular and chemical composition. Yang *et al.* (2007) record that the main gases that are formed during torrefaction are H₂, CO and CO₂ (Table 3). Hemicellulose with higher carboxyl functional groups showed higher CO₂ yield. Cellulose has a high yield of CO, due to the thermal degradation of carbonyl and carboxyl. Lignin has the highest yield of H₂ and CH₄, which is attributable to the high content of aromatic rings and methoxyl groups (O-CH₃), responds to cracking and deformation of this compound, resulting in a large release of H₂ and CH₄.

The release of C₂H₄ and C₂H₆, in general, is very low compared to other gases. Dehydroxylation of the carboxyl group (-COOH) plays a crucial role in the production of the oxygen-containing gas (Table 3). H₂ is comes from the cracking

La liberación de C_2H_4 y C_2H_6 , en general es muy baja, en comparación con otros gases. La deshidroxilación del grupo carboxilo (-COOH) tiene un papel crucial en la producción del gas que contiene oxígeno (Cuadro 3). El H_2 proviene, principalmente, del agrietamiento y deformación de los grupos de los alquenos (C=C) y de los enlaces carbono-oxígeno (C-H), mientras el CH_4 se debe, fundamentalmente, al agrietamiento del grupo metoxilo (-O- CH_3).

Cuadro 3. Rendimiento del gas obtenido de la torrefacción de los componentes de la biomasa.

Componente	Rendimiento del gas producido (m M g ⁻¹ biomasa)					
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
	Hemicelulosa	8.75	5.37	1.57	9.72	0.05
Celulosa	5.48	9.91	1.84	6.58	0.08	0.17
Lignina	20.84	8.46	3.98	7.81	0.03	0.42

Fuente: Yang *et al.* (2007).

Shah y Gardner (2012) citan que la formación de CO se debe a la deshidratación o reacciones de descarboxilación; el aumento de la producción de CO es causado por la reacción del CO₂ y vapor de agua. La liberación de CO₂ se presenta por la descarboxilación de los grupos de ácidos de la biomasa.

Los gases no condensables formados en la torrefacción de tallos de *G. herbaceum* y paja de *T. aestivum* fueron principalmente: CO y CO₂. Debido al incremento de la temperatura y a que el contenido de volátiles de *G. herbaceum* es mayor (76.92 %) que en la paja de *T. aestivum* (71.59 %); se observan pequeñas cantidades de CH₄ y H₂ que se liberan a los 400 °C (Wang *et al.*, 2011). Shah y Gardner (2012), al comparar la composición del gas de madera y de residuos agrícolas observaron que los residuos se caracterizan por una mayor producción de CO₂. La relación de CO y CO₂ aumenta con la temperatura, debido a que la celulosa y la lignina se descomponen a mayor temperatura.

Rendimiento energético

El rendimiento energético refleja la magnitud de la conversión de energía de la biomasa durante el proceso de torrefacción (Wang *et al.*, 2011). Bergman y Kiel (2005), registran un rendimiento energético de 94.9 % (Cuadro 4), mientras que Bergman *et al.* (2005a) informan un rendimiento energético de 90 % de energía de la biomasa y 10 % de la energía se transformó en calor. Bates y Ghoniem (2013) señalan que el rendimiento energético (en términos del poder calorífico) del producto sólido obtenido es un importante parámetro de la torrefacción.

and deformation of the alkene groups (C = C) and carbon-oxygen (C-H) bonds, while CH₄ is mainly due to the cracking of the methoxy group (-O-CH₃).

Table 3. Yield of the obtained gas from torrefaction of the biomass compounds.

Compound	Yield of the produced gas (m M g ⁻¹ biomass)					
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Hemicellulose	8.75	5.37	1.57	9.72	0.05	0.37
Cellulose	5.48	9.91	1.84	6.58	0.08	0.17
Lignin	20.84	8.46	3.98	7.81	0.03	0.42

Source: Yang *et al.* (2007).

Shah and Gardner (2012) cite that CO formation is due to dehydration or decarboxylation reactions; The increase in CO production is caused by the reaction of CO₂ and water steam. The release of CO₂ is presented by the decarboxylation of the acid groups of the biomass.

The non-condensable gases formed in the torrefaction of stems of *G. herbaceum* and straw of *T. aestivum* were mainly: CO and CO₂. Due to the increase in temperature and to the fact that the volatile content of *G. herbaceum* is higher (76.92%) than in the *T. aestivum* straw (71.59 %); small amounts of CH₄ and H₂ are observed, which are released at 400 °C (Wang *et al.*, 2011). Shah and Gardner (2012), when comparing the composition of wood gas and agricultural residues observed that the residues are characterized by a higher production of CO₂. The ratio of CO and CO₂ increases with temperature, because cellulose and lignin decompose at higher temperatures.

Energy efficiency

The energy yield reflects the magnitude of the energy conversion of the biomass during the torrefaction process (Wang *et al.*, 2011). Bergman and Kiel (2005) recorded an energy yield of 94.9 % (Table 4), whereas Bergman *et al.* (2005a) reported an energy yield of 90 % of biomass energy and 10 % of energy was converted to heat. Bates and Ghoniem (2013) point out that the energy yield (in terms of calorific value) of the solid product obtained is an important parameter of torrefaction.



Cuando 4. Rendimiento energético de biomasa torrefacta a diferentes temperaturas de torrefacción.

Biomasa	Temperatura (°C)	Rendimiento energético (%)
<i>Salix</i> spp. ¹	280	94.90
Leñosas ²	240	99.90
Leñosas ²	260	91.40
Leñosas ²	280	80.40
<i>Leucaena</i> spp. ³	200	94.10
<i>Leucaena</i> spp. ³	250	76.20
Briquetas de madera ⁴	220	95.90
Briquetas de madera ⁴	250	78.40
Astillas de <i>Pinus</i> spp. ⁵	250	90.00
Astillas de <i>Pinus</i> spp. ⁵	275	87.00
Astillas de <i>Pinus</i> spp. ⁵	300	71.00
Residuos forestales ⁵	250	92.00
Residuos forestales ⁵	275	82.00
Residuos forestales ⁵	300	72.00
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	240	99.90
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	260	91.40
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	280	80.40

Fuente: ¹ = Bergman y Kiel (2005); ² = Kim *et al.* (2012); ³ = Wannapeer *et al.* (2011); ⁴ = Chew y Doshi (2011); ⁵ = Phanphanich y Mani (2011).

Propiedades químicas de los productos sólidos obtenidos en la torrefacción

La torrefacción influye significativamente en las propiedades químicas de la biomasa. La caracterización de la composición proximal y elemental de la biomasa permite determinar, si un producto es aceptable como combustible. Los análisis proximales consisten en determinar el porcentaje de humedad, carbón fijo, material volátil y cenizas (Na *et al.*, 2015). Los análisis elementales son una herramienta para caracterizar las propiedades del producto (Sadaka y Negi, 2009).

Análisis proximales

Cuando la temperatura del proceso de torrefacción es alta, existen cambios significativos en la composición proximal debido a que disminuye el contenido de humedad, el material volátil y las cenizas, pero aumenta el porcentaje de carbón fijo debido a la desvolatilización de la biomasa. El carbón fijo es la masa de materia orgánica restante que queda después

Table 4. Energy yield of torrefacted biomass at different temperatures of torrefaction.

Biomass	Temperature (°C)	Energy yield (%)
<i>Salix</i> spp. ¹	280	94.90
Woody ²	240	99.90
Woody ²	260	91.40
Woody ²	280	80.40
<i>Leucaena</i> spp. ³	200	94.10
<i>Leucaena</i> spp. ³	250	76.20
Wood briquettes ⁴	220	95.90
Wood briquettes ⁴	250	78.40
<i>Pinus</i> spp. splinters ⁵	250	90.00
<i>Pinus</i> spp. splinters ⁵	275	87.00
<i>Pinus</i> spp. splinters ⁵	300	71.00
Forest residues ⁵	250	92.00
Forest residues ⁵	275	82.00
Forest residues ⁵	300	72.00
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	240	99.90
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	260	91.40
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	280	80.40

Source: ¹ = Bergman and Kiel (2005); ² = Kim *et al.* (2012); ³ = Wannapeer *et al.* (2011); ⁴ = Chew and Doshi (2011); ⁵ = Phanphanich and Mani (2011).

Chemical properties of the solid products obtained in torrefaction

Torrefaction influences significantly the chemical properties of the biomass. The characterization of the proximal and elemental composition of the biomass allows to determine, if a product is acceptable as fuel. The proximal analyzes are to determine the percentage of moisture, fixed carbon, volatile material and ash (Na *et al.*, 2015). Elemental analyzes are a tool to characterize product properties (Sadaka and Negi, 2009).

Proximal analyzes

When the temperature of the torrefaction process is high, there are significant changes in the proximal composition due to the decrease in moisture content, volatile material and ashes, but the percentage of fixed carbon increases due to the devolatilization of the biomass. Fixed carbon is the mass of remaining organic matter remaining after the volatile material and moisture are released. It is considered the most important energy component, which generates a crystalline

de que se libera el material volátil y la humedad. Se le considera el componente de mayor importancia energética, que genera una estructura cristalina, en lo cual el enlace químico se rompe en átomos de carbono (Bustamante-García *et al.*, 2015). Está formado por estructuras carbonosas que al finalizar el proceso forman la masa carbonosa sólida de la biomasa tratada hasta la combustión. En diversas investigaciones se documenta que en la torrefacción de diferentes tipos de biomasa se incrementa el contenido de carbón fijo conforme aumenta la temperatura del proceso (Cuadro 5).

structure, in which the chemical bond breaks down into carbon atoms (Bustamante-García *et al.*, 2015). It is formed by carbonaceous structures that at the end of the process form the solid carbonaceous mass of the treated biomass until the combustion. In several investigations it is documented that in the torrefaction of different types of biomass the fixed carbon content increases as the temperature of the process increases (Table 5).



Cuadro 5. Resultados de análisis proximales de diversos tipos de biomasa sometidas a diferentes temperaturas de torrefacción (valores en base seca).

Biomasa	Temperatura (°C)	Carbón fijo (%)	Material volátil (%)	Cenizas (%)
Tallo de <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	250	44.48	36.13	12.69
Tallo de <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	300	48.00	31.16	14.74
Tallo de <i>Triticum aestivum</i> L. ¹	250	43.66	28.21	23.30
Tallo de <i>Triticum aestivum</i> L. ¹	300	55.43	14.84	24.95
Madera torrefacta ²	250	28.00	55.00	1.50
Madera torrefacta ²	300	30.00	65.00	-
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	250	19.00	66.00	4.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	300	30.00	42.00	5.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	350	53.00	32.00	6.00
<i>Eucalyptus</i> sp. ⁴	250	24.70	75.00	0.30
<i>Eucalyptus</i> sp. ⁴	300	44.10	55.60	0.30
<i>Picea</i> spp. ⁵	200	15.95	83.92	0.12
<i>Picea</i> sp. ⁵	225	25.12	74.40	0.14
<i>Betula pendula</i> Roth ⁵	200	14.76	85.15	0.09
<i>Betula pendula</i> Roth ⁵	225	26.09	73.71	0.13
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill ⁶	240	20.37	79.56	0.07
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill ⁶	280	24.13	75.60	0.27
<i>Pinus</i> sp. ⁷	225	22.75	76.37	0.87
<i>Pinus</i> sp. ⁷	250	29.02	70.03	0.94
<i>Pinus</i> sp. ⁷	275	42.49	56.53	0.98

Fuente: ¹ = Wang *et al.* (2011); ² = Shankar-Tumuluru (2011); ³ = Chen *et al.* (2015a); ⁴ = Lu *et al.* (2012); ⁵ = Bach *et al.* (2014); ⁶ = Rousset *et al.* (2012); ⁷ = Lee-Carter (2012).



Table 5. Results of proximal analysis of different types of biomass subjected to different torrefaction temperatures (values on dry basis).

Biomass	Temperature (°C)	Fixed Carbon (%)	Volatile material (%)	Ashes (%)
Stem of <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	250	44.48	36.13	12.69
Stem of <i>Gossypium herbaceum</i> L. ¹	300	48.00	31.16	14.74
Stem of <i>Triticum aestivum</i> L. ¹	250	43.66	28.21	23.30
Stem of <i>Triticum aestivum</i> L. ¹	300	55.43	14.84	24.95
Torrefacted wood ²	250	28.00	55.00	1.50
Torrefacted wood ²	300	30.00	65.00	-
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	250	19.00	66.00	4.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	300	30.00	42.00	5.00
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ³	350	53.00	32.00	6.00
<i>Eucalyptus</i> sp. ⁴	250	24.70	75.00	0.30
<i>Eucalyptus</i> sp. ⁴	300	44.10	55.60	0.30
<i>Picea</i> spp. ⁵	200	15.95	83.92	0.12
<i>Picea</i> sp. ⁵	225	25.12	74.40	0.14
<i>Betula pendula</i> Roth ⁵	200	14.76	85.15	0.09
<i>Betula pendula</i> Roth ⁵	225	26.09	73.71	0.13
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill ⁶	240	20.37	79.56	0.07
<i>Eucalyptus grandis</i> W.Hill ⁶	280	24.13	75.60	0.27
<i>Pinus</i> sp. ⁷	225	22.75	76.37	0.87
<i>Pinus</i> sp. ⁷	250	29.02	70.03	0.94
<i>Pinus</i> sp. ⁷	275	42.49	56.53	0.98

Source: ¹ = Wang *et al.* (2011); ² = Shankar-Tumuluru (2011); ³ = Chen *et al.* (2015a); ⁴ = Lu *et al.* (2012); ⁵ = Bach *et al.* (2014); ⁶ = Rousset *et al.* (2012); ⁷ = Lee-Carter (2012).

Los compuestos orgánicos volátiles se remueven de la biomasa; a medida que se incrementa la temperatura, el contenido de volátiles disminuye y se vuelve más hidrofóbico, difícil de encender, además cambia de color marrón a oscuro (Ratte *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012); en cambio, el alto contenido de volátiles puede ser benéfico en la co-combustión con carbón mineral, debido a que la mezcla permite aumentar la temperatura de ignición y, como consecuencia, el poder calorífico (Demirbas, 2004). Demirbas (2003) indica que el producto con alto porcentaje de material volátil y bajo contenido de carbón fijo reduce la friabilidad y fragilidad; también aumenta su resistencia a la compresión y cohesión.

Las cenizas son residuos sólidos inorgánicos generados en la oxidación completa de la biomasa a altas temperaturas, están compuestas de silicatos, carbonatos, sulfatos y otros minerales (Lee-Carter, 2012). Las cenizas indican la cantidad de minerales que tiene el producto sólido que será sometido a oxidación

Volatile organic compounds are removed from the biomass; As the temperature increases, volatile content decreases and becomes more hydrophobic, difficult to ignite, and changes from brown to dark (Ratte *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012); however, the high volatile content may be beneficial in the co-combustion with mineral coal, because the mixture allows to increase the ignition temperature and, consequently, the calorific value (Demirbas, 2004). Demirbas (2003) indicates that the product with high percentage of volatile material and low fixed carbon content reduces the friability and fragility; It also increases its resistance to compression and cohesion.

Ashes are solid inorganic wastes generated in the complete oxidation of biomass at high temperatures, are composed of silicates, carbonates, sulfates and other minerals (Lee-Carter, 2012). The ash indicates the amount of minerals the solid product has that will be subjected to complete oxidation; as its value decreases ensures that the biomass will be converted to fuel

completa; a medida que su valor disminuye se garantiza que la biomasa será convertida eficientemente en combustible. Thyrel *et al.* (2013) consignan que las cenizas se consideran un subproducto industrial y contaminante ambiental, debido a que tienen un alto contenido de metales alcalinos; por lo tanto, son altamente reactivas.

Las concentraciones de elementos inorgánicos en la biomasa, como el sílice, azufre y metales alcalinos son una desventaja, porque forman silicatos alcalinos o sulfatos que se funden o ablandan a temperaturas de 700 °C (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012). Ahmaruzzaman (2009) identificó que, durante la combustión del producto sólido, la ceniza puede reaccionar con el azufre y cloro, lo cual provoca la formación de escoria, suciedad y problemas de corrosión.

Los compuestos inorgánicos pueden absorber calor y humedad, lo cual baja la eficiencia del proceso; por lo tanto, es un parámetro que afecta directamente el poder calorífico. En los combustibles de madera, el contenido de corteza influye en el contenido de cenizas; principalmente, porque la corteza tiene niveles más altos de impurezas minerales, como arena y tierra.

Kim *et al.*, (2012) observaron que el contenido de compuestos inorgánicos en la biomasa cruda y torrefacta de *Liriodendron tulipifera* L., cambia ligeramente, excepto el Fe y Zn que, probablemente, se liberaron en la superficie del acero inoxidable del reactor, donde se realizó la torrefacción (Cuadro 6). Bridgeman *et al.* (2008) documentan que los compuestos inorgánicos absorben calor de la misma manera que la humedad, con ello disminuye la eficiencia de la torrefacción y estimula la formación de residuos carbonosos (char). Por lo tanto, el contenido de los inorgánicos influye, de manera directa, en el poder calorífico.

efficiently. Thyrel *et al.* (2013) report that ash is considered an industrial by-product and environmental pollutant because it has a high alkali metal content; therefore, they are highly reactive.

Concentrations of inorganic elements in biomass such as silica, sulfur and alkali metals are a disadvantage because they form alkali silicates or sulfates that melt or soften at temperatures of 700 °C (Shankar-Tumuluru *et al.*, 2012). Ahmaruzzaman (2009) found that, during the combustion of the solid product, the ash can react with sulfur and chlorine, which causes the formation of slag, dirt and corrosion problems.

Inorganic compounds can absorb heat and moisture, which lowers process efficiency; Therefore, it is a parameter that directly affects the calorific value. In wood fuels, the bark content influences the ash content; mainly because the crust has higher levels of mineral impurities, such as sand and earth.

Kim *et al.*, (2012) observed that the content of inorganic compounds in the raw and roasted biomass of *Liriodendron tulipifera* L., changes slightly, except for Fe and Zn, which were probably released on the stainless steel surface of the reactor, where torrefaction was made (Table 6). Bridgeman *et al.* (2008) document that inorganic compounds absorb heat in the same way as moisture, thereby decreasing the efficiency of torrefaction and stimulating the formation of carbonaceous residues (char). Therefore, the content of the inorganic influences, directly, the calorific value.



Cuadro 6. Compuestos inorgánicos obtenidos de la biomasa de *Liriodendron tulipifera* L. torrefactada a diferentes condiciones.

Compuesto inorgánico	Condiciones de la torrefacción						
	Material crudo	240 °C	240 °C	260 °C	260 °C	280 °C	280 °C
	(ppm)	3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min
Al	54.00	58.00	46.00	48.00	49.00	50.90	61.00
Ca	1600	1310	1330	1360	1320	1300	1600
Cr	3.96	2.26	1.96	2.58	2.1	2.75	1.79
Cu	13.40	8.78	12.60	13.20	6.72	12.10	8.62
Fe	83.4	2690	2130	4170	2140	4750	2320
K	443	403	411	418	419	474	500
Mg	222	196	197	205	203	217	243
Mn	14.50	33	29.8	46.9	31.1	48.8	36.8
Na	40.00	41.50	47.10	43.40	43.40	50.40	47.40
Ni	0.36	0.38	0.40	0.68	0.35	81.00	0.41

Continúa Cuadro 6..

Continúa Cuadro 6..

Compuesto inorgánico	Condiciones de la torrefacción						
	Material crudo (ppm)	240 °C		260 °C		280 °C	
		3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min
P	100.00	70.00	69.00	81.00	73.00	81.00	91.00
Pb	6.69	7.15	7.75	8.90	6.86	18.80	5.54
S	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Si	175	105	73.30	97.80	70.20	67.00	89.20
Zn	22.70	93.20	86.60	97.70	117	124	87.90

Fuente: Kim *et al.* (2012).Table 6. Inorganic compounds obtained from the roasted biomass of *Liriodendron tulipifera* L. at different conditions.

Inorganic compound	Torrefaction conditions						
	Raw matter (ppm)	240 °C		260 °C		280 °C	
		3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min	3-10 min	10-30 min
Al	54.00	58.00	46.00	48.00	49.00	50.90	61.00
Ca	1600	1310	1330	1360	1320	1300	1600
Cr	3.96	2.26	1.96	2.58	2.1	2.75	1.79
Cu	13.40	8.78	12.60	13.20	6.72	12.10	8.62
Fe	83.4	2690	2130	4170	2140	4750	2320
K	443	403	411	418	419	474	500
Mg	222	196	197	205	203	217	243
Mn	14.50	33	29.8	46.9	31.1	48.8	36.8
Na	40.00	41.50	47.10	43.40	43.40	50.40	47.40
Ni	0.36	0.38	0.40	0.68	0.35	81.00	0.41
P	100.00	70.00	69.00	81.00	73.00	81.00	91.00
Pb	6.69	7.15	7.75	8.90	6.86	18.80	5.54
S	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Si	175	105	73.30	97.80	70.20	67.00	89.20
Zn	22.70	93.20	86.60	97.70	117	124	87.90

Source: Kim *et al.* (2012).

Análisis elementales

Los análisis elementales detectan características importantes de la biomasa, ya que muestran, exactamente, los elementos atómicos que contiene. La composición puede variar de acuerdo al tipo de biomasa y de la región donde se colecta. Su determinación en la fracción orgánica de la madera torrefacta permite establecer el balance de la masa y energía de la combustión, para aprovechar en forma eficiente el combustible (Bustamante-García *et al.*, 2015). Además, es importante determinar su contenido para equilibrar las ecuaciones químicas que ayudan a predecir los productos que resultan de una reacción química (Friedl *et al.*, 2005; Sheng y Azevedo, 2005). Los análisis elementales se realizan con métodos de oxidación, descomposición y

Elementary analysis

The elemental analyzes detect important features of the biomass, since they show, exactly, the atomic elements that it contains. The composition may vary according to the type of biomass and the region where it is collected. Their determination in the organic fraction of the roasted wood allows to establish the balance of the mass and energy of the combustion, in order to efficiently use the fuel (Bustamante-García *et al.*, 2015). In addition, it is important to determine its content to balance chemical equations that help predict products that result from a chemical reaction (Friedl *et al.*, 2005; Sheng and Azevedo, 2005). Elemental analyzes are performed with oxidation,

reducción. En el Cuadro 7 se observa que en la composición elemental de diversos tipos de biomasa, el carbono varía de 48.05 a 69.56 %, el hidrógeno 1.58 a 3.63 %, el oxígeno 17.63 a 27.60 %, el nitrógeno hasta un máximo de 0.70 % y el azufre menos de 0.02 %.

decomposition and reduction methods. Table 7 shows that in the elemental composition of various types of biomass, carbon varies from 48.05 to 69.56 %, hydrogen 1.58 to 3.63 %, oxygen from 17.63 to 27.60 %, nitrogen to a maximum of 0.70 % and Sulfur less than 0.02 %.

Cuadro 7. Resultados de análisis elementales de diferentes tipos de biomasa sometidas a torrefacción (base seca).

Biomasa	Temperatura (°C)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cenizas (%)
<i>Eucalyptus</i> spp. ¹	250	57.80	4.90	37.00	0.00	0.00	0.30
<i>Eucalyptus</i> spp. ¹	300	68.20	4.20	27.30	0.00	0.00	0.30
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	250	55.81	1.50	38.45	0.52	0.00	3.83
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	300	69.56	1.58	23.25	0.12	0.00	5.38
Cáscara de <i>Oryza sativa</i> L. ³	250	48.05	4.63	33.40	0.70	0.00	13.18
Cáscara de <i>Oryza sativa</i> L. ³	300	69.56	4.77	17.63	0.28	0.00	23.11
Madera torrefacta ⁴	250	51.30	5.90	40.90	0.40	-	1.50
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	260	52.42	5.81	29.22	0.15	-	-
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	280	54.42	5.65	27.21	0.15	-	-
<i>Abies alba</i> Mill. ⁶	225	56.92	5.87	37.07	0.07	-0.02	-
<i>Betula pendula</i> Roth ⁶	225	56.92	5.86	37.13	0.09	-0.02	-
Residuos de café ⁷	503K	55.10	6.36	36.29	2.25	Nulo	-
Residuos de café ⁷	563K	58.82	6.01	32.53	2.64	Nulo	-
Residuos de café ⁷	623K	67.03	4.95	25.28	2.74	Nulo	-
<i>Pinus</i> sp. ⁸	225	53.67	5.70	39.02	0.78	-	0.87
<i>Pinus</i> sp. ⁸	250	57.14	5.27	35.83	0.84	-	0.96
<i>Pinus</i> sp. ⁸	275	64.17	4.81	29.27	0.81	-	0.98

Fuente: ¹ = Lu *et al.* (2012); ² = Chen *et al.* (2015a); ³ = Chen *et al.* (2012); ⁴ = Shankar-Tumuluru (2011); ⁵ = Kim *et al.* (2012); ⁶ = Bach *et al.* (2014); ⁷ = Tsai y Liu (2013); ⁸ = Lee-Carter (2012).

Table 7. Elemental analysis results of different types of biomass subjected to roasting (dry basis).

Biomass	Temperature (°C)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ashes (%)
<i>Eucalyptus</i> spp. ¹	250	57.80	4.90	37.00	0.00	0.00	0.30
<i>Eucalyptus</i> spp. ¹	300	68.20	4.20	27.30	0.00	0.00	0.30
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	250	55.81	1.50	38.45	0.52	0.00	3.83
<i>Bambusa sinospinosa</i> McClure ²	300	69.56	1.58	23.25	0.12	0.00	5.38
<i>Oryza sativa</i> L. shell ³	250	48.05	4.63	33.40	0.70	0.00	13.18
<i>Oryza sativa</i> L. shell ³	300	69.56	4.77	17.63	0.28	0.00	23.11
Torrefacted wood ⁴	250	51.30	5.90	40.90	0.40	-	1.50
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	260	52.42	5.81	29.22	0.15	-	-

Continue Table 7...

Continue Table 7...

Biomass	Temperature (°C)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ashes (%)
<i>Liriodendron tulipifera</i> L. ⁵	280	54.42	5.65	27.21	0.15	-	-
<i>Abies alba</i> ⁶	225	56.92	5.87	37.07	0.07	<0.02	-
<i>Betula pendula</i> Roth ⁶	225	56.92	5.86	37.13	0.09	<0.02	-
Coffee residues ⁷	503K	55.10	6.36	36.29	2.25	Nulo	-
Coffee residues ⁷	563K	58.82	6.01	32.53	2.64	Nulo	-
Coffee residues ⁷	623K	67.03	4.95	25.28	2.74	Nulo	-
<i>Pinus</i> sp. ⁸	225	53.67	5.70	39.02	0.78	-	0.87
<i>Pinus</i> sp. ⁸	250	57.14	5.27	35.83	0.84	-	0.96
<i>Pinus</i> sp. ⁸	275	64.17	4.81	29.27	0.81	-	0.98

Source: ¹ = Lu *et al.* (2012); ² = Chen *et al.* (2015a); ³ = Chen *et al.* (2012); ⁴ = Shankar-Tumuluru (2011); ⁵ = Kim *et al.* (2012); ⁶ = Bach *et al.* (2014); ⁷ = Tsai and Liu (2013); ⁸ = Lee-Carter (2012).

Cuando el proceso se lleva a cabo a altas temperaturas, el contenido de carbono en la masa se incrementa; mientras, el hidrógeno y el oxígeno se reducen; en cambio, a bajas temperaturas y tiempo reducido de residencia, los cambios son limitados. Según Di Blasi (2008), la biomasa tratada a bajas temperaturas retiene altos porcentajes de nitrógeno; y a altas temperaturas se libera en forma de gas con HCN. Algunos autores aseguran que la cantidad de nitrógeno en el producto sólido no produce efectos negativos al ambiente, si se compara con los combustibles fósiles que presentan valores de 1.0 a 1.5 % (Jenkins *et al.*, 1998; Demirbas, 2005).

Si el producto presenta alto contenido de azufre puede tener efectos negativos, ya que reduce la temperatura en el proceso, limita la expulsión de gases y al oxidarse se forma SO₃, que provoca problemas en calderas, para finalmente transformarse en ácido sulfúrico (H₂SO₄), que se libera a la atmósfera. Shankar-Tumuluru *et al.* (2012), cuando la biomasa se torrefacta a 300 °C, el contenido de azufre en la biomasa disminuye aproximadamente 50 %.

Conclusiones


El proceso de torrefacción mejora las propiedades químicas de la biomasa vegetal, al aumentar su calidad como combustible. La composición química se modifica al degradarse térmicamente la hemicelulosa, celulosa y lignina, afectando principalmente la hemicelulosa. Los grupos hidroxilos se fragmentan, lo que permite obtener un producto hidrofóbico. En la torrefacción se obtienen productos sólidos, líquidos y gases. La calidad del producto sólido depende de la biomasa y condiciones del proceso, ya que conforme aumenta la temperatura y el tiempo de residencia, el porcentaje de carbón fijo y poder calorífico se incrementan. El rendimiento másico y energético dependen de las condiciones en que se realiza la torrefacción, ya que al aumentar la temperatura el rendimiento másico y

When the process is carried out at high temperatures, the carbon content in the mass increases; meanwhile, hydrogen and oxygen are reduced; in contrast, at low temperatures and reduced residence time, changes are limited. According to Di Blasi (2008), biomass treated at low temperatures retains high percentages of nitrogen, and at high temperatures it is released as a gas with HCN. Some authors assert that the amount of nitrogen in the solid product does not produce negative effects on the environment compared to fossil fuels with values ranging from 1.0 to 1.5 % (Jenkins *et al.*, 1998; Demirbas, 2005).

If the product has a high content of sulfur, it can have negative effects, since it reduces the temperature in the process, it limits the expulsion of gases and when it oxidizes it forms SO₃, that causes problems in boilers, to finally transform into sulfuric acid (H₂SO₄), which is released into the atmosphere. Shankar-Tumuluru *et al.* (2012) state that, when the biomass is roasted at 300 °C, the sulfur content in the biomass decreases by approximately 50 %.

Conclusions

The torrefaction process improves the chemical properties of plant biomass, as it increases its quality as fuel. The chemical composition is transformed as hemicellulose, cellulose and lignin are thermally degraded, mainly, the first one. The hydroxyl groups are fragmented, which allows to obtain a hydrophobic product. Solid, liquid and gas products are obtained in torrefaction. The quality of the solid product depends on biomass and the conditions of the process, as temperature rises and the time of residence, the percentage of fixed carbon and calorific power do as well. The mass and energy yield depend on the conditions in which torrefaction is made, as both yields decrease when temperature gets higher; conversely, it increases the liquid and gas yield. Therefore, mass and energy yield is an indicator of the efficiency of the torrefaction process. ▀

energético se reduce; en cambio, aumenta el rendimiento de líquidos y gases. Por lo tanto, el rendimiento másico y energético es un indicador de la eficiencia del proceso de torrefacción. 

Agradecimientos

El primer autor desea extender su agradecimiento al Dr. José Rodolfo Goche Telles y asesores por el apoyo que brindado a lo largo de los estudios de doctorado y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el financiamiento otorgado para el mismo fin.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Verónica Bustamante García: revisión de literatura, elaboración de la propuesta inicial, corrección de observaciones y envío del manuscrito; Artemio Carrillo Parra: elaboración de la estructura del manuscrito, elaboración de propuesta, revisión de correcciones; José Ángel Prieto Ruíz: revisión de manuscrito inicial y correcciones en la versión final; José Javier Corral-Rivas: revisión del manuscrito inicial y corrección de versión final; José Ciro Hernández Díaz: corrección de versión final.

Referencias

- Abdullah, S. S., S. Yusup, M. Ahmad, A. Ramli and L. Ismail. 2010. Thermogravimetry study on pyrolysis of various lignocellulosic biomass for potential hydrogen production. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 3(3): 137-144.
- Ahmaruzzaman, M. 2009. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* 13(3):327-363.
- Alemán-Nava, G. S., V. H. Casiano-Flores, D. L. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chávez, N. Scarlat, J. Mahlknecht, D. Jean-Francois and R. Parra. 2014. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32: 140-153.
- Almeida, G., J. O. Brito and J. Perré. 2010. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology* 101(24): 9778-9784.
- Arteaga-Pérez, L. E., M. Flores, M. Escobar, C. Segura and A. Gordon. 2015. Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus radiata*. *Energética* (46): 5-12.
- Bach, Q. V., K. Q. Tran, Ø. Skreiberg, R. A. Khalil and A. N. Phan. 2014. Effects of wet torrefaction on reactivity and kinetics of wood under air combustion conditions. *Fuel* 137: 375-383.
- Basu, P., S. Rao and A. Dhungana. 2013. An investigation into the effect of biomass particle size on its torrefaction. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 91(3): 466-474.
- Bates, R. B. and A. F. Ghoniem, 2013. Biomass torrefaction: Modeling of reaction thermochemistry. *Bioresource Technology* 134: 331-340.
- Bergman, P. C. A., A. R. Boersma, J. H. A. Kiel, M. J. Prins, K. J. Ptasiński and F. G. G. Janssen. 2005a. Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass. Report ECN-C--05-026. ECN. Petten, The Netherlands. 50 p.
- Bergman, P. C. A., A. R. Boersma, R. W. R. Zwart and J. H. A. Kiel. 2005b. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "Biocoal". Report ECN-C-05-013. ECN. Petten, The Netherlands. https://www.researchgate.net/profile/Robi_Zwart/publication/204978559_Torrefaction_of_biomass_Co-firing_in_Existing_Coal-Fired_Power_Stations/links/09e41511c9aaf0e1c7000000.pdf (23 de febrero de 2017).

Acknowledgements

The first author wishes to extend her gratitude to Dr. José Rodolfo Goche Telles and advisers for the support he provided throughout the doctoral studies and to the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (National Council of Science and Technology) (Conacyt) for the financing granted for the same purpose.

Conflict of de interests

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Verónica Bustamante García: review of literature, preparation of the initial proposal, correction of observations and submission of the manuscript; Artemio Carrillo Parra: preparation of the structure of the manuscript and of the proposal, review of corrections; José Ángel Prieto Ruíz: review of the initial manuscript and corrections of the final version; José Javier Corral-Rivas: review of the initial manuscript and corrections of the final version; José Ciro Hernández Díaz: correction of the final version.

End of the English version

- Bergman, P. C. A. and J. H. A. Kiel. 2005. Torrefaction for biomass upgrading. Conference proceedings of 14th european biomass conference and exhibition. Paris, France. 17-21 October. Energy Research Center of the Netherlands. ECN. Petten, The Netherlands. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf> (10 de agosto de 2016).
- Brebu, M. and C. Vasile. 2010. Thermal degradation of lignin-A review. *Cellulose Chemistry and Technology* 44 (9): 353-363.
- Bridgeman, T. G., J. M. Jones, I. Shield and P. T. Williams. 2008. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion Properties. *Fuel* 87(6): 844-856.
- Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, R. G. Ramírez-Lozano, J. J. Corral-Rivas and F. Garza-Ocañas. 2013. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla*. Humb., & Bonpl. in Brazilian beehive kiln. *Industrial Crops and Products* 42: 169- 174.
- Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, D. J. Vega-Nieva, J. R. Goche-Telles, J. J. Corral-Rivas, J. A. Prieto-Ruiz and R. Solis-Moreno. 2015. Densificación energética por torrefacción de la biomasa vegetal. In: Carrillo-Parra, A. y J. G. Rutiaga-Quiñones (ed.). *Biocombustibles sólidos*. Göttingen, Lower, Saxony, Alemania. pp. 262-183.
- Chen, W.-H. and K. P.-C. Kuo. 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy* 3(6):803-811.
- Chen, W.-H., S.-W. Du, C.-H. Tsai and Z.-Y. Wang. 2012. Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces. *Bioresource Technology* 111:433-438.
- Chen, W.-H., S.-H. Liu, T.-T. Juang, C.-M. Tsai and Y.-Q. Zhuang. 2015a. Characterization of solid and liquid products from bamboo torrefaction. *Applied Energy* 160: 829-835.
- Chen, W. H., J. Peng and X. T. Bi. 2015b. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44: 847-866.
- Chew, J. J. and V. Doshi. 2011. Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 4212-4222.
- Couhert, C., S. Salvador and J. M. Commandre. 2009. Impact of torrefaction on syngas production from wood. *Fuel* (88):2286-90.
- Cuervo, L., J. L. Folch y R. E. Quiroz. 2009. Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *Biotecnología* 13 (3): 11-35.
- Demirbas, A. 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management* 44(9): 1465-1479.

- Demirbas, A. 2004. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 31(2): 171-192.
- Demirbas, A. 2005. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 31(2): 171-192.
- Demirbas, A. 2009. Biorefineries: current activities and future developments. *Energy Conversion and Management* 50(11): 2782-2801.
- Di Blasi, C. 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science* 34(1): 47-90.
- Friedl, A., E. Padouvas, H. Rotter and K. Varmuza. 2005. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta* 544(1-2): 191-198.
- Jenkins, B., L. L. Baxter and T. R. Miles. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology* 54(1): 17-6.
- Kim, Y. H., S. M. Lee, H. W. Lee and J. W. Lee. 2012. Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*). *Bioresource Technology* (116): 120-125.
- Kumar, A., N. Kumar, P. Baredar and A. Shukla. 2015. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 530-539.
- Lee-Carter, C. 2012. Physicochemical properties and thermal decomposition of torrefied woody biomass and energy crop. MS Thesis. Faculty of Auburn University. Auburn, AL, USA. 173 p.
- Li, H. X., R. Liu, X. T. Legros, C. Bi, J. Limand and S. Sokhansanj. 2012. Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. *Bioresource Technology* 103(1): 453-458.
- Lima, R. L. 2013. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Tesis Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL, México. 55 p.
- Lu, K.-M., W.-J. Lee, W.-H. Chen, S.-H. Liu and T.-C. Lin. 2012. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology* 123: 98-105.
- Lu, K.-M., W.-H. Chen and T.-C. Lin. 2013. Thermogravimetric analysis and kinetics of co-pyrolysis of raw/ torrefied wood and coal blends. *Applied Energy* 105: 57-65.
- Maffeo, A. J. 2003. La Guerra de Yom Kippur y la crisis del petróleo de 1973. *Revista Relaciones Internacionales* 25:2-6.
- Mohan, D., C. U. Pittman and P. H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels* 20(3): 848-889.
- Montoya-Arbeláez, J. I., F. Chejne-Janna, E. F. Castillo-Montolla, J. R. Acero-Reyes, C. A. Gómez-Gutiérrez, J. A. Sarmiento-Chaparro, C. F. Valdez-Rentería, L. L. Garzón-Fuentes, J. O. Osorio-Velasco, D. F. Tirado, L. A. Blanco, N. Moreno-Safra, G. Marrugo y E. Y. Ospina-Aguirre. 2014. Pirolysis rápida de la biomasa. *Ecopretrol*. Medellín, Colombia 173 p.
- Na, B.-I., B.-J. Ahn and J.-W. Lee. 2015. Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction. *Wood Science and Technology* 49(2): 257-272.
- Na, B.-I., Y.-H. Kim, W.-S. Lim, S.-M. Lee, H.-W. Lee and J.-W. Lee. 2013. Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. *Biomass and bioenergy* 52: 159-165.
- Nhuchhen, D. R., P. Basu and B. Acharya. 2014. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*. DOI: 10.5171/2014.506376.
- Peng, J. H., X. T. Bi, S. Sokhansanj and C. J. Lim. 2013. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel* 111: 411-421.
- Phanphanich, M. and S. Mani. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* 102: 1246-1253.
- Ratte, J., E. Fardet, D. Mateos and J., J. S. Héry. 2011. Mathematical modelling of a continuous biomass torrefaction reactor: TORSFYD column. *Biomass and Bioenergy* 35: 3481-3495.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 2016. Energías renovables 2015, reporte de la situación mundial - hallazgos clave. <https://www.yumpu.com/en/document/view/54755817/gsr2015-key-findings-spanish/14> (24 de febrero de 2017).
- Rousset, P., K. Fernandes, A. Vale, L. Macedo and A. Benoit. 2013. Change in particle size distribution of torrefied biomass during cold fluidization. *Energy* 51: 71-77.
- Rousset, P., L. Macedo, J. M. Commandré and A. Moreira. 2012. Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96: 86-91.
- Rowell, R. M. 2012. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press. Boca Raton, FL, USA. 703 p.
- Sadaka, S. and S. Negi. 2009. Improvements of Biomass Physical and Thermochemical Characteristics via Torrefaction Process. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 28(3): 427-434.
- Scheller, H. V. and P. Ulvskov. 2010. Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology* 61:263-289.
- Septien, S., S. Valin, C. Dupont, M. Peyrot and S. Salvador. 2012. Effect of particle size and temperature on woody biomass fast pyrolysis at high temperature (1000-1400 °C). *Fuel* 97: 202-10.
- Shah, Y. T. and T. H. Gardner. 2012. Biomass torrefaction: applications in renewable energy and fuels. *Encyclopedia of chemical processing*. Taylor & Francis Group. New York, NY, USA. 18 p.
- Shankar-Tumuluru, J., R. D. Boardman, C. T. Wright and J. R. Hess. 2012. Some chemical compositional changes in Miscanthus and white oak sawdust samples during torrefaction. *Energies* 5(10): 3928-3947.
- Shankar-Tumuluru, J., S. Sokhansanj, J. R. Hess, T. C. Wright, D. R. Boardman. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology* 7(5): 384-401.
- Sheng, C. and J. L. T. Azevedo. 2005. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy* 28(5): 499-507.
- Sjöström, E. 1993. *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Academic Press, Inc. London, UK. 293 p.
- Sun, R. and J. Tomkinson. 2003. Characterization of hemicelluloses isolated with tetraacetylenediamine activated peroxide from ultrasound irradiated and alkali pre-treated wheat straw. *European polymer journal* 39(4): 751-759.
- Thyrel, M., R. Samuelsson, M. Finell and T. A. Lestander. 2013. Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy* 102: 1288-1294.
- Tsai, W.-T. and S.-C. Liu. 2013. Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 102: 47-52.
- Van der Stelt, M. J. C., H. Gerhauser, J. H. A. and K. J. Ptasinski. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass and Bioenergy* 35(9): 3748-3762.
- Vanholme, R., B. Demedts, K. Morreel, J. Ralph and W. Boerjan. 2010. Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology* 153(3): 895-905.
- Wang, G., Y. Luo, J. Deng, J. Kuang and Y. Zhang. 2011. Pretreatment of biomass by torrefaction. *Chinese Science Bulletin* 56(14): 1442-1448.
- Wannapeer, J., B. Fungtammasan and N. Worasuwannarak. 2011. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 92: 99-105.
- Yang, H., R. Yan, H. Chen, D. H. Lee and C. Zheng. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86(12): 1781-1788.
- Zanzi, D. R., T. Ferro, A. Torres, S. P. Beaton and E. Björnbo. 1989. Biomass torrefaction. <http://hem.fyrinstorg.com/zanzi/paper/zanziV2A-17.pdf> (5 de octubre de 2016).
- Zheng, A., Z. Zhao, S. Chang, Z. Huang, X. Wang, F. He and H. Li. 2013. Effect of torrefaction on structure and fast pyrolysis behavior of corncobs. *Bioresource Technology* 128: 370-377.





Artículo / Article

Áreas naturales protegidas y sistema de uso común de recursos forestales en el Nevado de Toluca

Protected natural areas and common use system of forest resources in *Nevado de Toluca*

José Antonio De La Cruz Hernández^{1,2}, Víctor Ávila Akerberg¹,
María Gladys Rivera Herrejón¹ e Ivonne Vizcarra Bord¹

Resumen

El ejido San Francisco Oxtotilpan posee un territorio de 2 107 ha, de las cuales 98 % son forestales y forma parte de tres áreas naturales protegidas, dos federales y una estatal. Esto genera una dinámica que entrelaza el aprovechamiento de recursos forestales a través de la conformación y funcionamiento de un sistema de recursos de uso común del ejido, con la política de conservación del patrimonio natural mediante áreas naturales protegidas. Situación que se reordenará con la propuesta actual del Gobierno Federal de generación de nuevos programas de conservación y manejo para las dos áreas protegidas federales, lo que propiciará más vigilancia y certidumbre normativa para el manejo de los recursos forestales al permitir que los ejidatarios perciban una mayor apropiación de su territorio. Sin embargo, no necesariamente se traducirá en una mejor integración a la cadena productiva. Los arreglos y acuerdos al interior del ejido, y de este con otras instituciones comunitarias y con instituciones formales, se verán modificados, por lo que ejercerán presiones sobre los sistemas naturales, lo que promoverá su reordenamiento. El presente análisis aporta elementos para la comprensión de tal dinámica y para la generación de acciones y políticas públicas de conservación y fomento del aprovechamiento forestal que tomen en cuenta su impacto sobre las instituciones comunitarias formales y no formales afines a un manejo participativo en las áreas naturales protegidas.

Palabras clave: Áreas naturales protegidas, Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, Área de Protección de Recursos Naturales Valle de Bravo-Malacatepec-Tilostoc y Temascaltepec, manejo forestal, Matlatzinca, San Francisco Oxtotilpan.

Abstract

San Francisco Oxtotilpan ejido is an agrarian entity whose territory overlaps with three natural protected areas (NPAs), two of which are under federal governance, while the other one is managed at the state level. About 98 % of the 2107 ha *ejido* lands are forested. A system of common natural resources management of the area is confronted with conservation policies of the natural heritage, in the form of federal and state protected areas. This situation is expected to reorganize with the current Federal Government proposal of new conservation and management programs for the two protected areas, which would encourage a higher surveillance and legal certainty for natural resources management which would allow the *ejido* members a broader sense of ownership of their territory. In other terms, the agreements within the *ejido*, and between the *ejido* and other community and formal institutions, will be modified so that they will involve pressures to the systems that will necessarily promote their re-organization. This paper brings elements towards the comprehension of this dynamic and for the development of conservation and forest use public policies and actions that consider the social impact on formal and informal community institutions for a participatory management in natural protected areas.

Key words: Protected natural areas, *Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area*, Natural Resource Protection Areas of *Valle de Bravo-Malacatepec-Tilostoc* and *Temascaltepec*, forest management, *Matlatzinca*, *San Francisco Oxtotilpan*.

Fecha de recepción/Reception date: 21 de octubre de 2015; Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de octubre de 2016.

¹ Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), Universidad Autónoma del Estado de México, México. Correo-e: vicaviak@gmail.com

² División de Tecnología Forestal, Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, México.

Introducción

Uno de los instrumentos más importantes de la política ambiental mexicana son las áreas naturales protegidas (ANP). Desde su inicio se consideró substancial incluir a los habitantes locales en su manejo, aunque se venía arrastrando una visión de conservación basada en el establecimiento de vedas permanentes al uso de los recursos forestales y la expropiación del territorio para protegerlo (Bautista-Calderón, 2007), lo cual condujo a la creación de los parques nacionales, y con ello, se restringió formalmente el aprovechamiento de los bosques a las comunidades.

En los hechos, los pobladores de estas áreas y sus zonas de influencia hacen uso de los bienes y servicios que estos ecosistemas brindan, y establecen instituciones comunitarias (no necesariamente formales, explícitas, ni reconocidas por las instituciones del Estado) que se pueden enmarcar dentro de los sistemas de recursos de uso común (Thomé, 2016). Una de sus principales características es el derecho compartido entre los miembros de la colectividad con base en un conjunto de reglas de acceso aceptadas por el grupo y que excluye a otros agentes no propietarios o poseedores, aunque no siempre se apeguen al principio de igualdad en cuanto al derecho al uso del recurso, pues más bien existen prácticas de diferenciación social (Ostrom, 1990; Álvarez, 2006).

Esta investigación tomó como estudio de caso al ejido San Francisco Oxtotilpan (SFO), por ser la institución formal de manejo del territorio más articulada a sus pobladores- comunidad como un sistema de recursos de uso común, en particular los forestales, pues se reconoce, además, su estrecha relación con las áreas naturales protegidas en las que se ubica.

El presente trabajo es una aportación al conocimiento de la relación sociedad-naturaleza en las áreas naturales protegidas de México con un acercamiento cualitativo que considera la perspectiva de análisis de una comunidad indígena, Matlatzinca, en el contexto de reestructuración del marco normativo de la región del Nevado de Toluca. El momento de adecuación jurídica está en discusión por diferentes actores sociales y, muchas veces, sin la suficiente información sobre la dinámica socio ambiental de dichas áreas. Por lo tanto, este estudio puede generar algunos indicadores para contribuir al proceso de diseño, instrumentación y ejecución de nuevas políticas públicas dirigidas al aprovechamiento sustentable y a la conservación de los bienes y servicios ambientales.

Materiales y Métodos

El ejido SFO forma parte del municipio Temascaltepec, al suroeste del Estado de México, con una superficie total de 2 107 ha, distribuidas en 1 950 ha de bosque (de pino y oyamel principalmente), 130 ha de pastizales y 27 ha de cultivo y se integra al pueblo indígena

Introduction

One of the most important instruments of Mexican environmental policy is the protected natural areas (ANPs). Even though from the outset it was considered substantial to include the local inhabitants in their management, a conservation vision based on the establishment of permanent closures to the use of forest resources and the expropriation of the territory to be protected was also being carried out (Bautista-Calderón, 2007), which led to the creation of national parks, and with it, a formal restriction on the use of forests for the communities.

In fact, the inhabitants of these areas and their areas of influence make use of the goods and services that these ecosystems provide, and establish community institutions (not necessarily formal, explicit, or recognized by State institutions) that can be framed within the common use of resource systems (Thomé, 2016). One of its main characteristics is the law shared among the members of the community based on a set of access rules accepted by the group and that excludes other agents who do not own or possess the land, although they do not always obey the principle of equality as to the right to use the resource, as rather there are practices of social differentiation (Ostrom, 1990, Álvarez, 2006).

This study took as a case study the *San Francisco Oxtotilpan* (SFO) *ejido*, as the formal institution of land management more linked to its community-inhabitants as a system of resources of common use, particularly forestry, since it is recognized, in addition, its close relationship with the protected natural areas in which it is located.

The present work is a contribution to the knowledge of the society-nature relationship in the protected natural areas of Mexico with a qualitative approach that considers the analysis perspective of an indigenous community, *Matlatzinca*, in the context of the restructuring of the normative framework of the *Nevado de Toluca* region. The moment of legal adaptation is under discussion by different social actors and, often, without sufficient information on the socio-environmental dynamics of these areas. Therefore, this study can generate some indicators to contribute to the process of designing, implementing and application of new public policies aimed at sustainable use and conservation of environmental goods and services.

Materials and Methods

The SFO *ejido* is part of *Temascaltepec* municipality, southwest of the State of Mexico, with a total area of 2 107 ha, made up by 1 950 ha of forest (mainly pine and fir), 130 ha of grassland and 27 ha of cultivation and integrated to the *Matlatzinca* indigenous town (Figure 1). Its soil is of forest vocation, although in it agricultural activities are carried out and to a lesser extent, extensive cattle ranching.

Matlatzinca (Figura 1). Su suelo es de vocación forestal, aunque en él se realizan actividades agrícolas y en menor medida de ganadería extensiva.

The *Matlatzinca* territory can be considered as a metasystem, formed by the *ejido* and the communal goods. Physiographically, the former encompasses, essentially, *Pinus* and *Abies-Pinus*

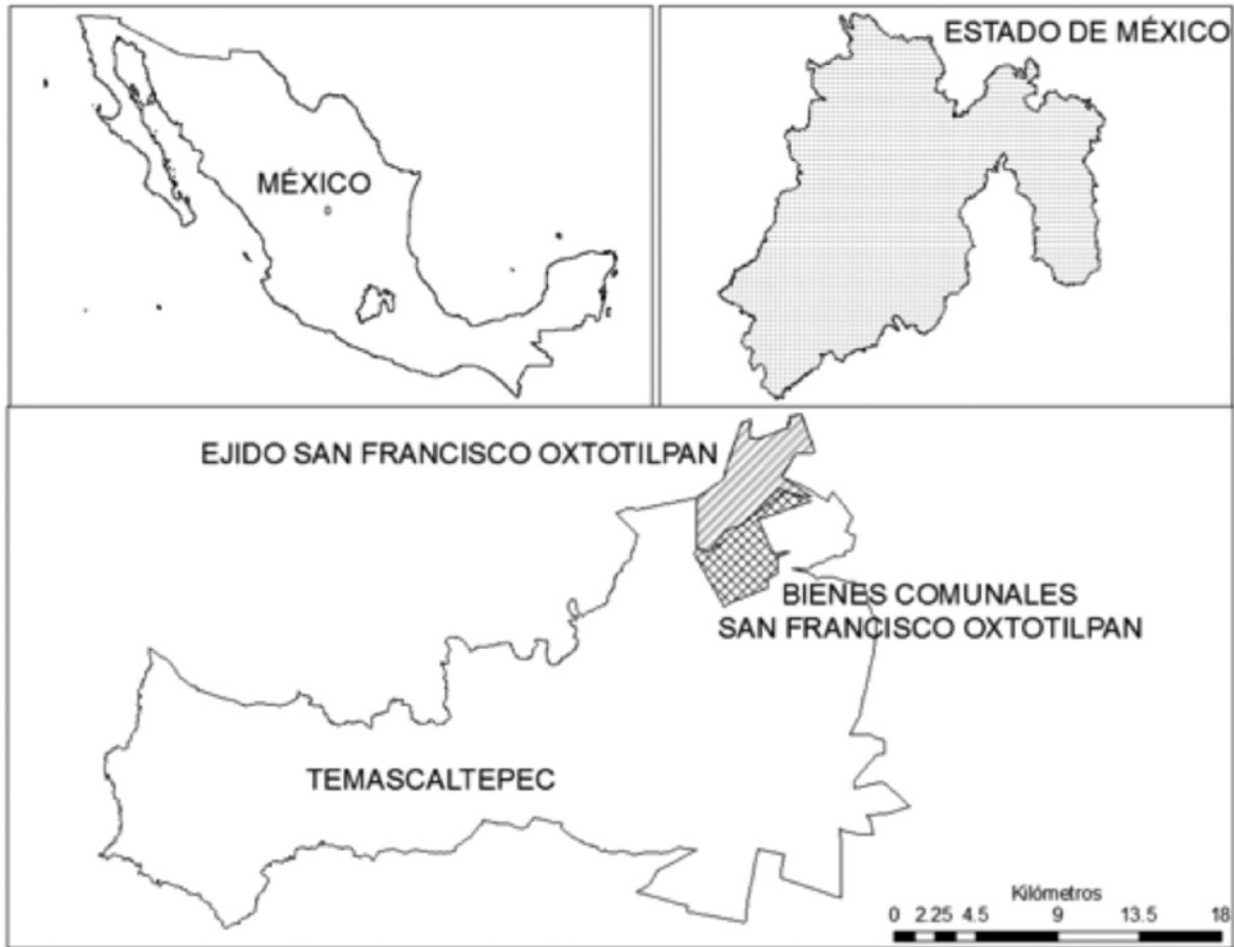


Figura 1. Ubicación del ejido San Francisco Oxtotilpan.
Figure 1. Location of *San Francisco Oxtotilpan ejido*.

El territorio Matlatzinca se puede considerar como un metasistema, conformado por el ejido y los bienes comunales. Fisiográficamente, el primero abarca, en esencia, bosques de *Pinus* y *Abies-Pinus* con pequeñas áreas agrícolas y pastizales, mientras que el segundo presenta bosques de *Pinus* y *Abies-Pinus*, valles agrícolas y asentamientos humanos que conforman el pueblo con sus siete barrios. Aquí no hay asentamientos humanos, pues tanto los ejidatarios como los demás habitantes del pueblo viven en el área de los bienes comunales.

Según el enfoque de los sistemas socioecológicos (Walker *et al.*, 2002), de la cota de los 3 000 msnm, el área natural protegida Nevado de Toluca, hasta 2013 con categoría de Parque Nacional, contenía áreas forestales que estaban vedadas al uso productivo. Otro subsistema estaba por debajo del límite mencionado, pero dentro del Área de Protección de

forests with small agricultural areas and pastures, while the second includes *Pinus* and *Abies-Pinus* forests, agricultural valleys and human settlements that make up the town with its seven neighborhoods. There are no human settlements here, because both, the *ejidatarios* and the other inhabitants of the village, live in the communal goods.

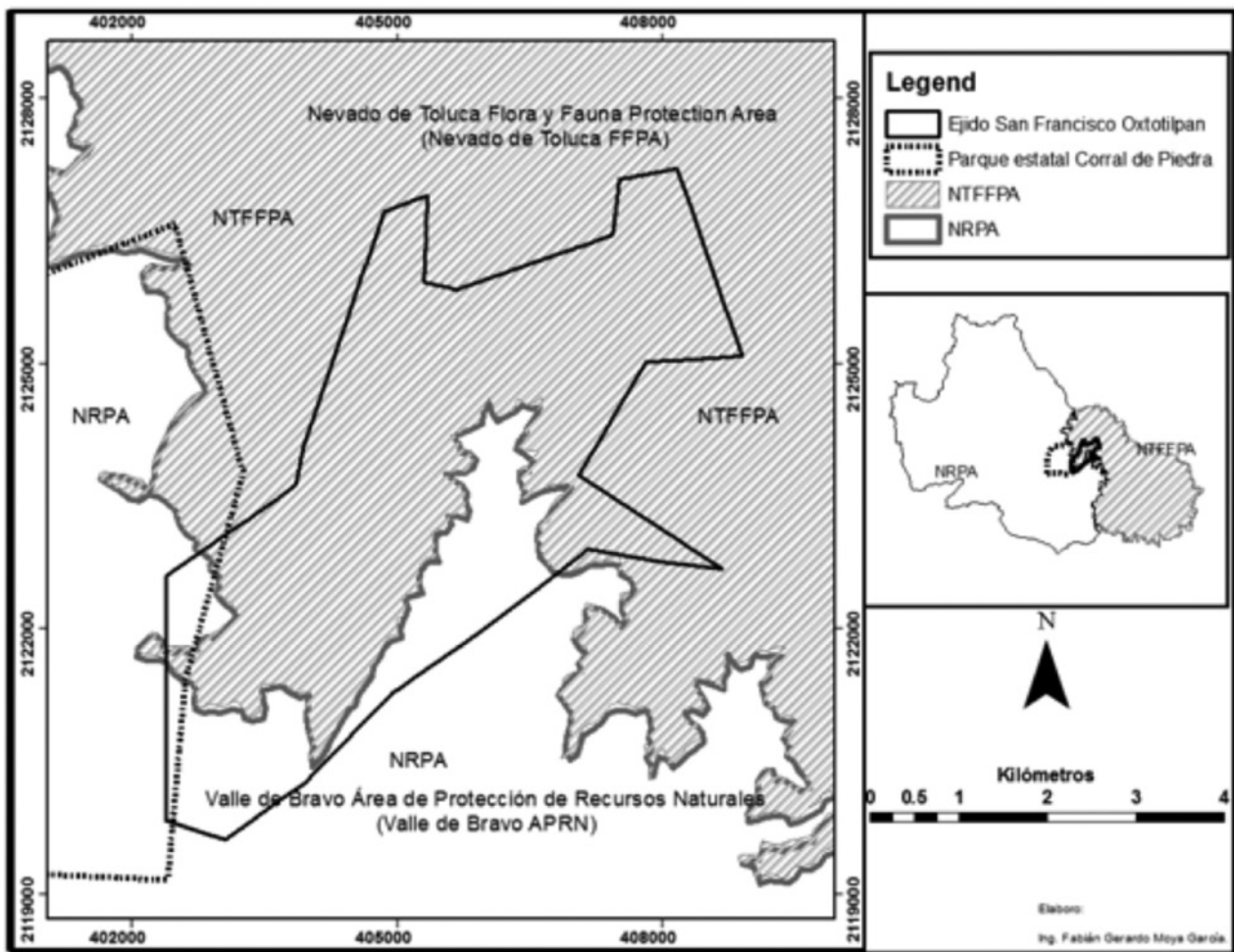
According to the approach of socioecological systems (Walker *et al.*, 2002), from the 3 000 masl, the protected natural area of Nevado de Toluca, until 2013 with National Park category, contained forest areas that were closed to productive use. Another subsystem was below the mentioned limit, but within the Área de Protección de Recursos Naturales Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec (Natural Resources Protection Area Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc and Temascaltepec) (APRNVB/MTT), with forest utilization zones.

Recursos Naturales Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec (APRNVBMTT), con zonas de aprovechamiento forestal. Finalmente, al oeste del ejido se ubica una pequeña franja en el área protegida estatal Parque Estatal Santuario del Agua Corral de Piedra.

Este escenario ha sido recategorizado de Parque Nacional a Área de Protección de Flora y Fauna, y hasta 2016 está en proceso de subzonificarse con la elaboración de los Programas de Conservación y Manejo de las dos áreas naturales protegidas federales (Figura 2).

Finally, to the west of the *ejido* is located a small strip in the *Santuario del Agua Corral de Piedra* (Corral de Piedra Water Sanctuary) State Protected Area.

This scenario has been reclassified from National Park to Protected Area of Flora and Fauna, and until 2016 is undergoing sub-zoning with the elaboration of Conservation and Management Programs of the two federal protected natural areas (Figure 2).



Fuente: Conanp, 2014; Semarnat, 2016.
Source: Conanp, 2014; Semarnat, 2016.

Figura 2. Áreas Naturales Protegidas y el ejido San Francisco Oxtotilpan.
Figure 2. Protected Natural Areas and San Francisco Oxtotilpan *ejido*.

Se realizó una investigación documental sobre el aprovechamiento de recursos naturales y la organización en el núcleo agrario y la localidad, con el fin de conocer los antecedentes y situación actual sobre el proceso de apropiación del territorio y sus recursos forestales.

A documentary research was carried out on the use of natural resources and the organization in the agrarian nucleus and the locality, in order to know the background and current situation on the process of appropriation of the territory and its forest resources.

Se emplearon métodos cualitativos para la recopilación de la información de primera mano y un método descriptivo para analizar las perspectivas de los ejidatarios.

En primera instancia se llevaron a cabo entrevistas con informantes clave como representantes agrarios, ejidatarios y familiares, asesores de organizaciones privadas y operadores de políticas públicas que inciden en la región. Durante el trabajo de campo, apoyados con el método de observación participante (Kawulich, 2006), se registraron los procesos de gestión de programas de gobierno y se ofreció acompañamiento en el recorrido de supervisión de programas de subsidio gubernamental en materia forestal en bosques del lugar.

En segunda instancia, se hizo una encuesta a 33 de los 69 ejidatarios en activo sobre la percepción en el uso de los recursos forestales del ejido y la relación con el área natural protegida Nevado de Toluca, mediante un cuestionario con 18 reactivos, con dos matrices de doble entrada sobre uso de recursos forestales. No se consideró una muestra probabilística, sino de intención consentida por parte de los ejidatarios al que se tuvo acceso durante el trabajo de campo y a que en una primera aplicación, con sólo 13 individuos, los resultados mostraron poca variabilidad en las respuestas. Esta información se sistematizó con base en una escala de percepción del estado de conservación de los recursos forestales, la cual se ordenó y analizó mediante estadística descriptiva para generar un modelo conceptual de apropiación de la naturaleza mediante un análisis de los flujos (García, 2006; García y Toledo, 2008) aplicado al sistema de uso común de recursos forestales del ejido.

Por otra parte, se propuso un escenario del uso de recursos forestales en el ejido bajo el nuevo marco normativo a partir de su uso actual, obtenido mediante la investigación documental y de campo, y se le comparó con lo permitido en las propuestas de programas de conservación y manejo en revisión de las ANP federales Nevado de Toluca y APRNVBMTT.

Resultados y Discusión

Caracterización del Sistema de Recursos Forestales de Uso Común del ejido San Francisco Oxtotilpan (SRFUC-SFO)

El SRFUC-SFO se conceptualiza como espacio geográfico delimitado dentro del territorio ejidal con 2 080 ha de bosque y pastizales, a excepción de las 27 ha de agricultura. Desde la perspectiva social, se considera a los 69 ejidatarios que participan en forma directa o indirecta en las asambleas y actividades acordadas en ellas, de los cuales 48 son hombres y 21 mujeres.

Qualitative methods were used for the collection of first-hand information and a descriptive method for analyzing the perspectives of the *ejidatarios*.

In the first instance, interviews were carried out with key informants such as agrarian representatives, ejidatarios and family members, advisors to private organizations and public policy operators in the region. During field work, supported by the participant observation method (Kawulich, 2006), the processes of management of government programs were recorded and accompaniment was offered in the supervision of government subsidy programs in forest in local forests.

In the second instance, a survey was conducted on 33 of the 69 *ejidatarios* in active employment on the perception of the use of the *ejido's* forest resources and the relationship with the protected natural area of *Nevado de Toluca*, through a questionnaire with 18 reagents, with two matrices of double entry on the use of forest resources. It was not considered a probabilistic sample, but a consenting effort on the part of the ejidatarios that was accessed during field work and that in a first application, with only 13 individuals, results showed little variability in the responses. This information was systematized based on a scale of perception of the state of conservation of forest resources, which was ordered and analyzed through descriptive statistics to generate a conceptual model of appropriation of nature through an analysis of the flows (García, 2006; García and Toledo, 2008) applied to the system of common use of forest resources of the *ejido*.

On the other hand, a scenario was proposed of the use of forest resources in the *ejido* under the new normative framework considering its current use, obtained through the documentary and field research, comparing it with that allowed in the proposals of conservation and management programs that are being reviewed by federal *Nevado de Toluca* and APRNVBMTT ANPs.

Results and Discussion

Description of the Common Use Forest Resources System of the *San Francisco Oxtotilpan Ejido* (SRFUC-SFO).

The SRFUC-SFO is conceptualized as a geographic space delimited within the *ejido* territory, with 2 080 ha of forest and grassland, with the exception of 27 ha of agriculture. From the social perspective, the 69 *ejidatarios* are considered directly or indirectly participating in the assemblies and activities agreed by them, of which 48 are men and 21 women.

As an immediate environment of this system, the Communal Goods of SFO and some small properties that together form the SFO town (metasystem) are conceptualized, with important

Como entorno inmediato de este sistema se conceptualiza a los Bienes Comunales de SFO y algunas pequeñas propiedades que en su conjunto conforman el Pueblo de SFO (metasistema); entre ellos existen importantes intercambios de materia, energía e información, e incluso se comparten sus propiedades.

En la muestra de ejidatarios encuestados el intervalo de edad es de los 32 a los 85 años, con un promedio de 67 años para las mujeres y 60.7 para los hombres, lo que representa un proceso de envejecimiento en la asamblea ejidal, aunque 22 % de los ejidatarios tiene de 30 a 49 años que representan al relevo generacional.

La escolaridad incluye desde la carencia total de estudios a la secundaria terminada (9 años); se destacan dos grupos dominantes, uno de mujeres sin estudios y otro de hombres con primaria concluida. El promedio de instrucción académica por género es de 1.9 años en las mujeres y de 4.8 años en los hombres. A partir de lo anterior sobresale el hecho de que las mujeres acumulan más edad y menos escolaridad como resultado de una histórica inequidad de género en cuanto al acceso a la tierra y la educación.

Es importante mencionar que las familias conforman redes que les confieren a sus integrantes un capital social que les permite el acceso a diferentes espacios y disponibilidad de recursos, lo cual propicia una mayor cohesión a los grupos, conformando así modos de vida que aprovechan el uso múltiple del bosque. Esta situación le da la característica de sistema difuso al SRFUC, pues los comuneros y familiares de ejidatarios pueden acceder a los recursos forestales por su relación con los mismos.

En el caso de los recursos maderables para autoconsumo (viviendas, áreas accesorias y herramientas), el área natural protegida Nevado de Toluca es el área de abastecimiento para todos los miembros del "pueblo" (ejidatarios, comuneros, vecindados y sus familiares), cuyas casas se asientan, principalmente, dentro de las tierras de los Bienes Comunales. El presidente del Comisariado Ejidal otorga la autorización de aprovechamiento para un volumen adecuado a este uso, de manera que no se dé lugar a una extracción excesiva de madera.

Con la asesoría de un Prestador de Servicios Técnicos Forestales (PSTF) se ejecuta el Plan de Manejo Forestal en el área fuera del ANP Nevado de Toluca; así, se establece el volumen de madera que se va a extraer, para lo cual se seleccionan y se marcan los árboles para el aprovechamiento. En esta actividad, junto con el uso comercial de recursos no maderables y en el pago por servicios hidrológicos, quienes tienen derecho a recibir utilidades o reparto, son los 69 ejidatarios formalmente reconocidos y listados. Además, el ejido aporta recursos para beneficio común como las fiestas patronales y las escuelas primaria y secundaria.

exchanges of matter, energy and information, and even their belongings.

In the sample of surveyed people, the age range is 32 to 85 years, with an average of 67 years for women and 60.7 for men, which represents an aging process in the *ejido* assembly, although 22 % of The *ejidatarios* are between 30 and 49 years old that would be constituted as their generational change.

The schooling includes a range that goes from the total lack of studies to the finished secondary school (9 years); two dominant groups, one of women without education and the other of men with completed primary education, stand out. The average academic instruction by gender is 1.9 years for women and 4.8 years for men. Based on the above, the fact is that women accumulate more age and less schooling as a result of a historical gender inequality in terms of access to land and education.

It is important to mention that families form networks that give their members a social capital that allows them access to different spaces and availability of resources, promotes greater cohesion among groups, thus forming ways of life that take advantage of the multiple use of the forest. This situation gives the characteristic of diffuse system to the SRFUC, since the comuneros (communers), neighbors and relatives of the ejidatarios can approach to forest resources by their relation with them.

In the case of timber resources (housing, accessory areas and tools), the protected natural area of *Nevado de Toluca* is the supply area for all members of the town (*pueblo*) (*ejidatarios*, *comuneros*, neighbors and their relatives), whose houses are mainly settled within the lands of the Communal Goods. The president of the Ejidal Commissariat grants the authorization of use for a volume suitable for this use, so that there is no excessive extraction of wood.

With the assistance of a Forest Technical Services Provider (PSTF), the Forest Management Plan is implemented in the area outside the Nevado de Toluca ANP; thus, the volume of wood to be extracted is established, for which the trees are selected and marked for harvesting. In this activity, along with the commercial use of non-timber resources and the payment for hydrological services, those who are entitled to receive profits or distribution, are the 69 *ejidatarios* formally recognized and listed. In addition, the *ejido* provides resources for common benefit such as patronage festivals and primary and secondary schools.

For more than 15 years, timber has been sold annually to a buyer in the metropolitan area of *Toluca* city, who is an entrepreneur of the timber industry, who purchases it on the ground (standing sale) and extracts it with his staff; he also hires a documenter who supervises the extraction of wood and the

Desde hace más de 15 años, la madera es vendida anualmente a un comprador de la zona metropolitana de Toluca, quien es un empresario de la industria maderera, que la adquiere en el terreno (venta en pie) y la extrae con su personal; también contrata a un documentador que supervisa la extracción de la madera y al Consejo de Vigilancia que supervisa estas labores. Sin embargo, los miembros del ejido no tienen conocimientos de cubicación de madera por lo que quedan supeditados a lo que indique el técnico y el documentador. Finalmente, la madera en troncos, ya propiedad del comprador, es trasladada al aserradero para su transformación en productos comerciales.

El PSTF brinda información a la asamblea ejidal en la que se consulta sobre aspectos del manejo del bosque y su comercialización, pero dichas explicaciones se dan en forma sintetizada y no todas son comprendidas por los ejidatarios, ni los representantes agrarios, dada su complejidad técnica y los bajos niveles de escolaridad de la mayoría de ellos, quienes, en muchos casos, intuyen que lo que les comunican, tanto el técnico y en algunos casos el comprador de la madera (contratista), no es totalmente cierto (resultado de entrevistas con varios ejidatarios).

En el área natural protegida, al no ser de interés comercial, el conocimiento técnico y científico y el monitoreo del territorio por parte del ejido es casi nulo, a excepción de áreas bajo supervisión por haber realizado el saneamiento forestal, o que están comprometidas para reforestación en proyectos gubernamentales o en el Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. En algunas ocasiones se hacen recorridos de reconocimiento del lugar.

En general existe una ambigüedad sobre el control y apropiación de estos terrenos, pues aunque los ejidatarios saben que formalmente es del ejido, no la consideran bajo su control, por lo que es muy común entre ellos la expresión: "Para cuidar, sí es nuestro, tenemos la responsabilidad, pero si queremos aprovechar, ahí sí no podemos, ya no es nuestro, es del gobierno".

A partir de lo anterior, queda claro que los datos de orden técnico y científico dasonómico y ambiental utilizados para elaborar el Programa de Manejo Forestal con el cual se toman decisiones en el uso de esta parte del territorio, son manipulados, principalmente, por agentes técnicos ajenos al ejido (PSTF, autoridades gubernamentales y el comprador, entre otros). Por lo tanto, prevalece una práctica tecnocrática que resulta más conveniente para los representantes gubernamentales, que para la propia comunidad, en la que los ejidatarios tienen una participación limitada en el control de sus recursos forestales.

Desde el punto de vista gubernamental, es menos complicado establecer un plan de manejo que solo considere aspectos técnicos, lo que podría excluir cualquier nivel de participación simbólica

Supervisory Board supervises these tasks. However, members of the *ejido* have no knowledge of wood cubication so they are subject to what the technician and the documenter indicate. Finally, the wood in logs, which is now property of the buyer, is transferred to the sawmill for its transformation into commercial products.

The PSTF provides information to the *ejido* assembly where he is consulted on aspects of forest management and its commercialization, but these explanations are given in a synthesized form and not all are understood by the ejidatarios, nor the agrarian representatives, given their technical complexity and the low levels of education of most of them, who, in many cases, intuit that what they communicate, both the technician and in some cases the buyer of the wood (contractor), is not totally true (the result of interviews with several *ejidatarios*).

In the natural protected area, since it is not of commercial interest, the technical and scientific knowledge and the monitoring of the territory by the *ejido* is almost null, except for areas under supervision for having led to the sanitation of the forest, or that are committed for reforestation in government projects and those committed in the Program for Payment for Hydrological Environmental Services. In some occasions they make reconnaissance tours of the place.

In general, there is an ambiguity about the control and appropriation of these lands, for although the *ejidatarios* know that it is formally of the *ejido*, they do not consider it under their control, reason why the expression: "To take care, yes it is ours, we have the responsibility, but if we want to take use it, there we can not, it's not ours, it's of the government." is a very common expression among them.

From the above, it is clear that the technical and scientific data, mensuring and environmental, used to elaborate the Program of Forest Management with which decisions are made in the use of this part of the territory, are manipulated, mainly, by technical agents external to the *ejido* (PSTF, governmental authorities and buyer, among others). Therefore, a technocratic practice prevails which is more convenient for government representatives than for the community itself, where ejidatarios have limited participation in the control of their forest resources.

From the governmental point of view, it is less complicated to establish a management plan that only considers technical aspects, which could exclude any level of symbolic participation (to inform, consult and appease) and of citizen power (to associate and delegate power) (Arnstein, 1996).

However, in the daily life of the population, labors are carried out in the *ejido* for the maintenance and conservation of the forest through jobs or cooperative work, as well as extraction

(informar, consultar y apaciguar) y de poder ciudadano (asociarse y delegar poder) (Arnstein, 1996).

No obstante, en la vida cotidiana de la población, en el ejido se realizan labores de mantenimiento y conservación del bosque mediante faenas o trabajo cooperativo, así como de los caminos de extracción, bajo las indicaciones de quienes representan al PSTF y la aprobación de las actividades en asamblea. De hecho, es frecuente que el PSTF solo dé las indicaciones y sea el Comisariado Ejidal y el Consejo de Vigilancia quienes planeen, convoquen y supervisen en campo las tareas.

Así por ejemplo, destacan algunas prácticas propias de la comunidad como el uso y manejo del musgo (*Thuidium* sp.), de la vara de perilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK.) y de la vara blanca (*Salvia hirsuta* Jacq.). Los compradores externos al SFO se acercan a las autoridades para negociar su explotación y comercialización. Una vez hecho el acuerdo, los representantes agrarios del ejido solicitan al PSTF la elaboración del estudio técnico justificativo y una notificación a Semarnat. La gestión para la autorización se hace entre el PSTF y el comisariado y posteriormente es "vendida" al comprador, quien generalmente trae a sus trabajadores para la extracción. Aun cuando dicha operación debiera dar cumplimiento de la normatividad ambiental y forestal, no es supervisada por el Comité de Vigilancia debido a que los mismos miembros y los trabajadores desconocen las condicionantes regulatorias para el aprovechamiento sustentable del recurso.

Por medio de la encuesta sobre la percepción del acceso y uso de los productos forestales, se identificaron 17, de los cuales 11 son los reconocidos por más de la mitad de los encuestados. Los recursos más utilizados son madera, leña, agua, morillos, hongos, vara de perilla y musgo. El acceso a estos lo tienen 90 % de quienes se identifican como ejidatarios y avocinados (Figura 3).

Con respecto al agua, en el predio existen 23 manantiales, corren 9.2 km de corrientes permanentes y 27.9 km de flujos intermitentes (Información de campo del Ordenamiento Territorial Comunitario de San Francisco Oxtotilpan), las cuales sirven para abastecer de agua potable, para riego agrícola y para el cultivo de trucha.

Nuevamente, con base en los resultados de la encuesta, la percepción sobre el estado de los recursos forestales es para la mayoría de los ejidatarios muy bueno y bueno en 14 de los 15 recursos mencionados, a excepción del paisaje (uso turístico), del que se tiene una percepción mala, regular y, en menor medida, muy mala. En la Figura 4 se presenta un modelo del SRFUC de SFO elaborado con base en el análisis de flujos y de apropiación de la naturaleza (García, 2006; García y Toledo, 2008).

roads, under the indications of those who represent the PSTF and the approval of the activities in assembly. In fact, it is not uncommon for the PSTF to be the only indications, and it is the ejidal Commissariat and the Supervisory Board who plan, convene and supervise the tasks in the field.

For example, some community practices such as the use and management of moss (*Thuidium* sp.), the pearl stick (*Symphoricarpos microphyllus* HBK.) and the white wand (*Salvia hirsuta* Jacq.) are highlighted. Buyers outside the SFO approach the authorities to negotiate their exploitation and commercialization. Once the agreement is reached, the agrarian representatives of the *ejido* request the PSTF to prepare the technical justification study and a notification to Semarnat (Ministry of the Environment and Natural Resources). The management for authorization is done between the PSTF and the curator and subsequently such management is "sold" to the buyer, who usually brings his workers to the extraction. Even if such an operation should be to comply with environmental and forestry regulations, it is not supervised by the Supervisory Committee because the same members and workers do not know the regulatory constraints for the sustainable use of the resource.

Through the survey on the perception of access to and use of forest products, 17 were identified, of which 11 are recognized by more than half the respondents. The most used resources are wood, firewood, water, morillo, fungi, pearl stick and moss. Access to these is 90 % of those identified as ejidatarios and neighbors (Figure 3).

In regard to water, there are 23 springs in the land, 9.2 km of permanent streams and 27.9 km of intermittent flows (Field Information of the *San Francisco Oxtotilpan* Community Territorial Ordinance), which serve to supply drinking water, and for agricultural irrigation as well as for the cultivation of trout.

Again, based on the results of the survey, it came that the perception on the state of the forest goods is very good and good for most of the ejidatarios in 14 of the 15 mentioned resources, except for the landscape (tourist use), to which it has poor, regular and, to a lesser extent, very poor perception. Figure 4 shows a SFO SRFUC model based on the analysis of flows and appropriation of nature (García, 2006; García and Toledo, 2008).



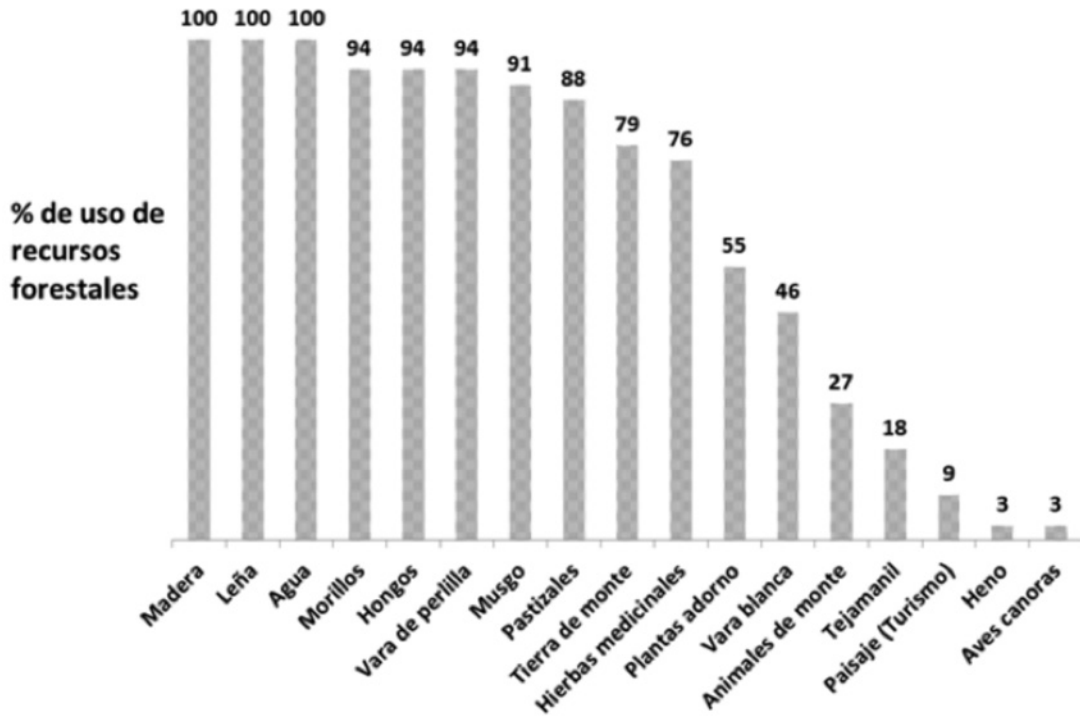


Figura. 3 Percepción sobre los recursos forestales utilizados por los habitantes de San Francisco Oxtotilpan.
 Figure. 3 Perception of the forest resources used by the inhabitants of *San Francisco Oxtotilpan*.

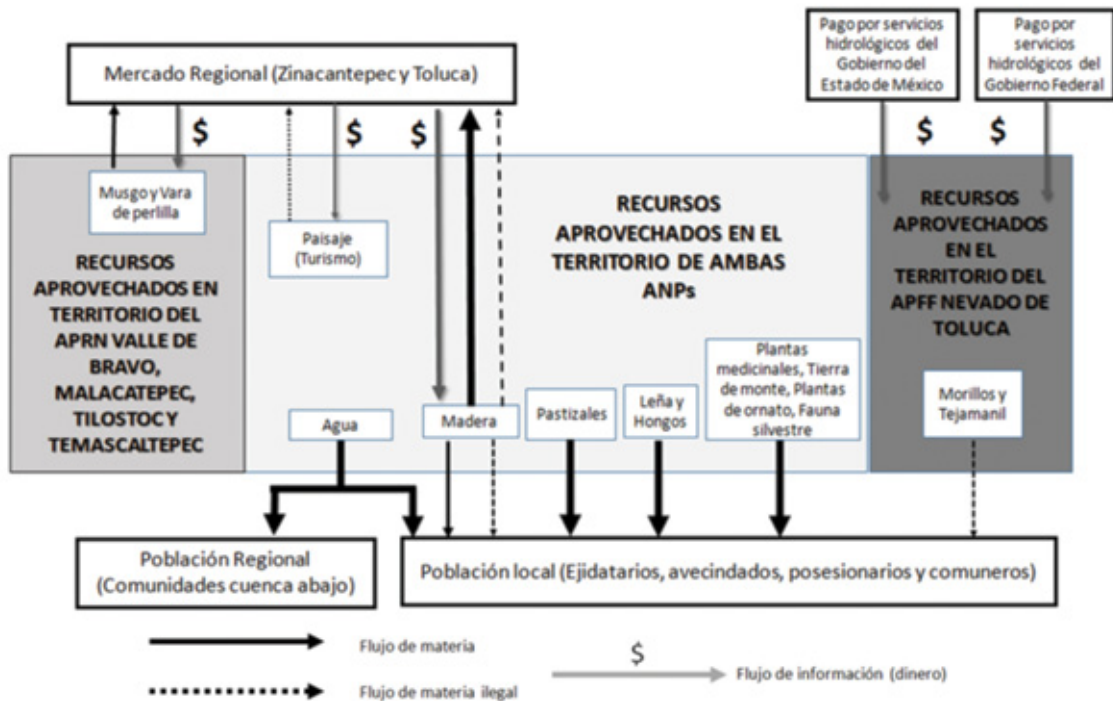


Figura 4. Sistema de RFUC de San Francisco Oxtotilpan.
 Figure 4. RFUC system of *San Francisco Oxtotilpan*.

Este sistema de recursos está articulado, de manera organizada con diferentes instituciones formales y no formales que operan en el territorio del pueblo de SFO: los dos núcleos agrarios, los delegados municipales como autoridades políticas vinculadas al municipio Temascaltepec, y el Comité de Aguas, que es una institución no formal validada por los "usos y costumbres" del pueblo Matlatzinca.

Los usos y costumbres están amparados por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (artículos 2° y 33) y vinculados con el Tratado 169 de la Organización Internacional del Trabajo, ratificado por el Gobierno Mexicano en 1990 (Gamboa y Gutiérrez, 2008). Así, el uso para autoconsumo de varios recursos no maderables que no tienen una regulación específica dentro de la legislación nacional o estatal cabe dentro de esta protección o incluso, en algunos casos como el agua y especies en riesgo, la autoridad no aplica los sistemas normativos formales ante el riesgo de violentar dichas tradiciones del pueblo Matlatzinca; por lo tanto, en los hechos, su manejo queda bajo la administración de las instituciones comunitarias.

De manera formal, los recursos forestales están regulados directamente por tres leyes y cuatro reglamentos federales, 16 normas ambientales federales, dos decretos de ANP federales y uno estatal, tres ordenamientos ecológicos, uno estatal y dos regionales y próximamente dos programas de conservación y manejo de ANP. De considerarlos todos, y una vez que se autoricen los programas mencionados para ambas ANP federales, se obtendría un esquema de instrumentos normativos bastante complejo para que opere eficientemente en el SRFUC-SFO, como se muestra en la Figura 5.

Uso del territorio e ingresos

En 2013, de la superficie forestal de 1 950 ha, 1 467 ha (64%) no contaban con aprovechamiento autorizado y fuera del parque nacional 380 ha (17 %) sí la tenían. Asimismo, 333.8 ha (15 %) recibían un subsidio del Gobierno Federal como pago por servicios ambientales (Conafor, 2013) y 103 ha (5 %) recibían pago por servicios hidrológicos del Gobierno del Estado de México (Gaceta de Gobierno, 2013). Esto cambió en 2014, ya que terminó el apoyo y solo 103 ha (5 %) reciben el pago estatal (Gaceta de Gobierno, 2013).

El Programa de Manejo Forestal se basa en el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares, que es de corta selectiva para el mantenimiento de una masa forestal irregular y multispecífica, que busca mantener la estructura de un bosque templado natural. En este programa se tienen identificadas 16 especies maderables, 12 latifoliadas y cuatro coníferas, que, por ser las más atractivas desde una perspectiva comercial son focales para el manejo forestal. El ciclo de corta propuesto para el aprovechamiento forestal maderable

This system of resources is organized organically with different formal and non-formal institutions that operate in the territory of the SFO town: the two agrarian nuclei, the Municipal Delegates as political authorities linked to the municipality of *Temascaltepec*, and the Water Committee, which is a non-formal institution validated by the "uses and customs" of the *Matlatzinca* people.

Uses and customs are protected by the Political Constitution of the Mexican United States (Articles 2 and 33) and linked to the Treaty 169 of the International Labor Organization, ratified by the Mexican Government in 1990 (Gamboa and Gutiérrez, 2008). Thus, the use for self-consumption of several non-timber resources that do not have a specific regulation within national or state legislation falls within this protection or even, in some cases like water and species at risk, the authority does not apply the normative formal systems in the face of the risk of violating the traditions of the *Matlatzinca* people; therefore, in fact, their management is under the administration of the community institutions.

Formally, forest resources are directly regulated by three federal laws and four regulations, 16 federal environmental standards, two federal and state ANP decrees, three ecological, one state and two regional, and two of conservation and ANP management programs. To consider them all, and once the above-mentioned programs are authorized for both federal ANPs, a rather complex scheme of normative instruments would be obtained to operate efficiently in the SRFUC-SFO, as shown in Figure 5.

Use of territory and income

In 2013, 1 467 ha (64 %) of the forest area of 1950 ha had no authorized use and 380 ha (17 %) were outside the national park. Likewise, 333.8 ha (15 %) received a Federal Government subsidy as payment for environmental services (Conafor, 2013) and 103 ha (5 %) received payment for hydrological services from the Government of the State of Mexico (Gaceta de Gobierno, 2013). This changed in 2014, as support ended and only 103 ha (5 %) receive the state payment (Gaceta de Gobierno, 2013).

The Forest Management Program is based on the Mexican Method of Irregular Forest Management, which is a selective cutting for the maintenance of an irregular and multispecific forest mass, which seeks to keep the structure of a natural temperate forest. In this program, 16 timber species, 12 broadleaf and 4 coniferous have been identified, which, being the most attractive from a commercial perspective, are focal to forest management. The proposed cutting cycle for timber harvesting is 10 years, which began in 2008 and is scheduled to be completed by 2018.

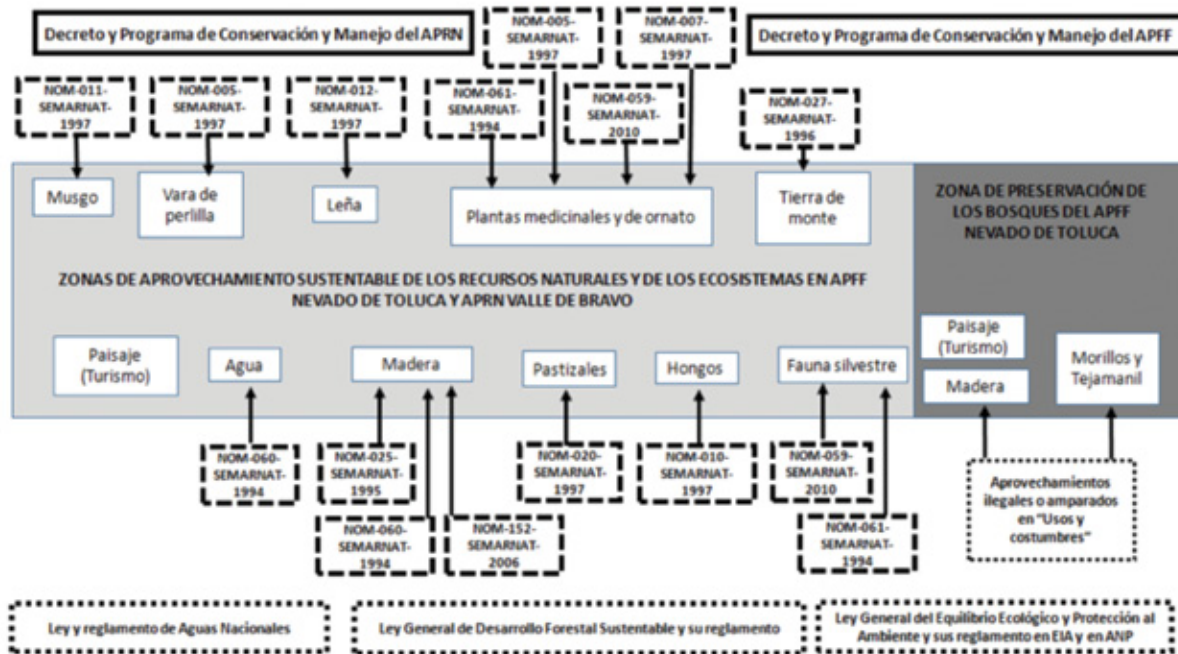


Figura 5. Marco normativo federal ambiental y forestal del SRFUC de San Francisco Oxtotilpan.
 Figure 5. Federal environmental and forest regulatory framework of San Francisco Oxtotilpan SRFUC.

es de 10 años, que inició en 2008 y se tiene programado terminarlo en 2018.

Para 2011 los precios por la venta de productos forestales maderables en el mercado de la región por metro cúbico fueron: de \$1 200.00 para pino; de \$500.00 para hojosas y encino; ambos montos están calculados con un aprovechamiento de madera en rollo de 70 %. En 2014, el gobierno estatal otorgó como subsidio por pago por servicios hidrológicos un total de \$154 500.00. Con ello se puede estimar que 20 % del territorio bajo aprovechamiento forestal persistente, generó 91 % de los ingresos.

Por su parte los subsidios por pago de servicios ambientales por conservación en 5 % del territorio contribuyeron con 9 % de los ingresos provenientes del bosque, mientras que 75 % permanecía como área natural protegida sin aprovechamiento comercial de recursos forestales. Cabe señalar que no todo el ingreso bruto es distribuido como "reparto" a los ejidatarios, puesto que un porcentaje se emplea para financiar gestiones administrativas y jurídicas, obras sociales y gastos de operación de las labores de mantenimiento del bosque (alimentos, materiales, equipo, gasolina y reparación de vehículos).

For 2011, prices for the sale of timber forest products in the region's market per cubic meter were: \$ 1 200.00 Mexican pesos for pine; \$ 500.00 Mexican pesos for broadleaves and oak; both amounts are calculated by using 70 % roundwood. In 2014, the state government granted a subsidy of a total of \$ 154 500.00 Mexican pesos for to pay for hydrological services. Thus, it can be estimated that 20 % of the territory under persistent forest use generated 91 % of the income.

On the other hand, the subsidies for payment of environmental services for conservation in 5 % of the territory contributed with 9 % of the income from the forest, while 75 % remained as a protected natural area without commercial use of forest resources. It should be noted that not all gross income is distributed as "distribution" to *ejidatarios*, since a percentage is used to finance administrative and legal actions, social works and operating expenses of the maintenance of the forest (food, materials, equipment, gasoline and vehicle repair).



Evaluación del nivel del ejido como Sistema de Recursos de Uso Común y como Empresa Forestal Comunitaria

Basado en la clasificación de Álvarez (2006) sobre la tipología de recursos de uso común en México, se identifica que el ejido estaría más cercano al Tipo 3, aunque contaría con elementos del Tipo 4. De esta manera se tiene la siguiente caracterización:

Tipo 3. Organizaciones de recursos de uso común asistidas, porque tienen un control relativo sobre el acceso y manejo de sus recursos naturales. Por lo general son comunidades que han logrado la reapropiación de sus recursos naturales y casi todas ellas han protagonizado una lucha por la recuperación del control de sus recursos.

Tipo 4. Organizaciones de recursos de uso común semi-asistidas, debido a que controlan claramente el acceso a sus recursos naturales y cuentan con reglas y reglamentos comunitarios para lograr una distribución equitativa de los beneficios. En general, están asociadas a algún financiamiento externo o gubernamental cuyo propósito fundamental es crear gobernabilidad en el manejo de recursos comunes.

Con respecto a la participación del ejido en la cadena productiva, se identifica el nivel de integración vertical en producción forestal maderable de acuerdo con la clasificación del Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales (Procymaf) de la Semarnat en el nivel II ("bajo"), de los cuatro tipos propuestos. Se caracteriza de la siguiente manera:

Tipo II. Productores que venden madera en pie: dueños o poseedores de predios sujetos a aprovechamientos forestales, a cargo de terceros mediante contrato de compra-venta, sin que el dueño o poseedor participe en alguna fase del aprovechamiento.

Asimismo, con base en el Índice de Desarrollo de la Actividad Forestal Comunitaria (Merino, 2014), el ejido obtiene un valor de "nueve" que equivale a "bajo nivel de desarrollo de la actividad forestal", en el cual se ubica 7.8 % de las comunidades forestales de México (Merino, 2014). En términos socioeconómicos, lo anterior se traduce en que la riqueza generada por los bosques se transmite a sujetos ajenos al ejido.

La perspectiva con el reordenamiento de las ANP en el oeste del Estado de México

Durante el año de 2013, en las dos ANP federales que tienen incidencia sobre el territorio del ejido, la Semarnat en colaboración con diferentes actores, realizó la propuesta de Planes de Conservación y Manejo para las mismas. Estos

Evaluation of the *ejido* level as a Common Use Resources System and as a Community Forestry Company

Based on Álvarez's (2006) classification on the typology of resources commonly used in Mexico, it is identified that the *ejido* would be closer to Type 3, although it would have Type 4 elements. In this way the following characterization is obtained:

Type 3. Assisted common resource organizations, because they have a relative control over the access and management of their natural resources. They are usually communities that have achieved the reappropriation of their natural resources and almost all of them have been involved in a struggle for the recovery of control of their resources.

Type 4. Semi-assisted resource-based organizations, because they clearly control access to their natural resources and have community rules and regulations to achieve an equitable distribution of benefits. In general, they are associated with some external or governmental financing whose fundamental purpose is to create governance in the management of common resources.

With regard to *ejido* participation in the production chain, the level of vertical integration in timber forest production is identified according to the classification of the Semarnat Forest Conservation and Sustainable Management Project (Procymaf) at level II ("low"), of the four types proposed. It is characterized as follows:

Type II. Producers selling standing timber: owners and / or owners of properties subject to forest exploitation, by third parties through a purchase contract, without the owner or holder participating in any phase of the harvest.

Likewise, based on the Index of Development of Community Forestry Activity (Merino, 2014), the *ejido* obtains a value of "nine" equivalent to "low level of development of forestry activity", which is 7.8 % of the forest communities of Mexico (Merino, 2014). In socioeconomic terms, this means that the wealth generated by forests is transmitted to subjects outside the *ejido*.

The perspective with the rearrangement of the ANPs in the western part of the State of Mexico

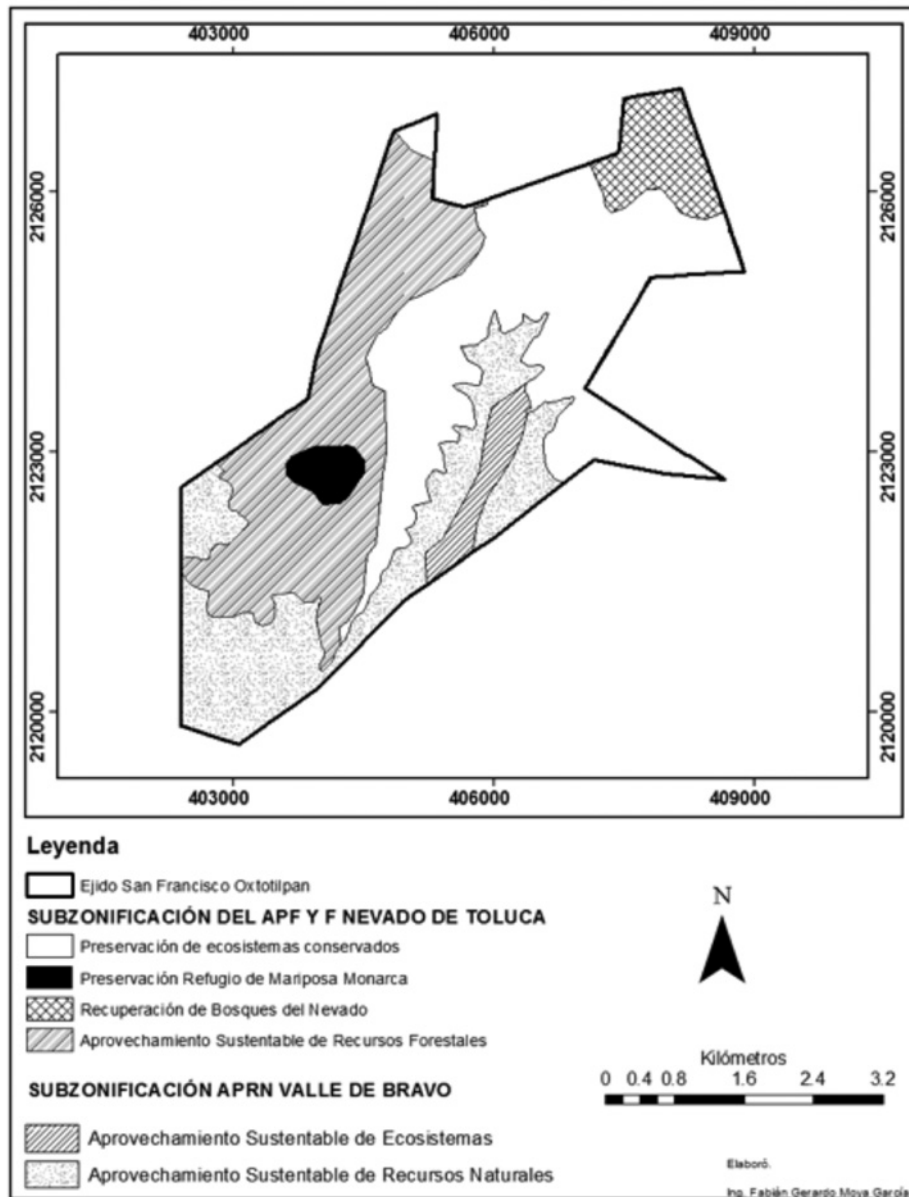
During the year 2013, in the two federal ANPs that have an impact on the territory of the *ejido*, Semarnat in collaboration with different actors, made the proposal of Conservation and Management Plans for them. These exercises are performed independently by each of the protected area directions, even though the *ejido* will have to assume the regulation of both.

ejercicios se realizan de manera independiente por cada una de las direcciones de las áreas protegidas, aun cuando el ejido va a tener que asumir la regulación de ambas.

Con el fin de identificar cuál es la subzonificación propuesta que regulará las modalidades de uso de suelo en el ejido, se elaboró un mapa en el que se conjuntaron ambas zonificaciones propuestas en el Programa de Conservación y Manejo de cada área (Figura 6).

In order to identify the proposed subzoning that will regulate the land use patterns in the *ejido*, a map was elaborated in which both zonifications proposed in the Conservation and Management Program of each area were combined (Figure 6).

Based on the map above, the subzones and activities allowed with direct relation to the SRFUC were identified:



Fuente: Conanp, 2014; Semarnat, 2016.

Source: Conanp, 2014; Semarnat, 2016.

Figura 6. Zonificación de áreas naturales protegidas federales en el territorio del ejido San Francisco Oxtotilpan.

Figure 6. Zoning of federal protected natural areas in the *San Francisco Oxtotilpan ejido*.

Con base en el mapa anterior, se identificaron las subzonas y las actividades permitidas con relación directa al SRFUC:

Subzonas de Preservación de Ecosistemas Conservados (SPEC)

Estas subzonas aparecen en el Programa de Conservación y Manejo del APFF; comprenden bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) densos, en buen estado de conservación, en cañadas con pendientes promedio mayores a 40 %, razón por la cual se les considera ecosistemas frágiles, debido a que la remoción de la vegetación puede derivar en erosión y pérdida del suelo. En estos sitios se permitirían actividades productivas de bajo impacto ambiental, manejo forestal para la preservación y restauración de los ecosistemas, e inducción de la regeneración natural (Conanp, 2014), de lo que resultarían dos SPEC en la misma APFF:

- A) Franja que abarca parte de las porciones noreste y centro del ejido y que forma una caña que corre hacia el sur del mismo con una superficie de 823 ha.
- B) Área compacta que se encuentra al extremo noroeste del ejido con 14.96 ha. En total conforman una superficie de 838 ha y representan 39.7 % del territorio ejidal.

Subzona Preservación de la mariposa Monarca

Esta subzona comprende superficies de bosque de oyamel denso en buen estado de conservación, en altitudes promedio de 3 220 a 3 430 m que favorece el establecimiento estacional de la mariposa Monarca (*Danaus plexippus* L.) En esta área se concederían actividades productivas de bajo impacto ambiental, manejo forestal para la preservación y restauración de los ecosistemas, mantenimiento de caminos existentes y reintroducción de especies nativas (Conanp, 2014). Se localiza en la zona centro del ejido, tiene una superficie de 45.8 ha y representa 2.17 % del territorio ejidal.

Subzona Recuperación Bosques del Nevado (SRBN)

Reúne a los bosques de pino (*Pinus hartwegii* Lindl.) fragmentados con coberturas de copa menores a 50 %. Aquí se desarrollarían el manejo forestal tendiente a la protección, conservación, restauración y preservación de los ecosistemas y el saneamiento forestal (Conanp, 2014). Es una pequeña porción al noroeste del ejido, con 136.4 ha, que corresponden a 6.4 % del territorio ejidal.



Preservation Sub-areas of Conserved Ecosystems (SPEC)

These subareas appear in the APFF Conservation and Management Program; they include dense Sacred fir forests (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.), in good state of conservation, in canyons with slopes average greater than 40 %, the reason why they can be considered fragile ecosystems, because the removal of the vegetation can lead to erosion and loss of the soil. In these places, productive activities of low environmental impact would be permitted, as well as forest management for the preservation of ecosystems, restoration of them and induction of natural regeneration (Conanp, 2014), resulting in two SPECs in the same APFF:

- A) Fringe that covers part of the northeast and central portions of the *ejido* and forming a wedge that runs to the south of it with an area of 823 ha.
- B) Compact area that is found to the northwest end of the *ejido* with 14.96 ha. In total they comprise an area of 838 ha and represent 39.7 % of the *ejidal* territory.

Monarch butterfly preservation subarea

This subarea includes areas of dense fir forest in good conservation status, at average altitudes of 3 220 to 3 430 m, which favors the seasonal establishment of the Monarch butterfly (*Danaus plexippus* L.). This area would allow productive activities of low environmental impact, forest management for ecosystem preservation and restoration, maintenance of existing roads and reintroduction of native species (Conanp, 2014). It is located in the central zone of the *ejido*, has an area of 45.8 ha and represents 2.17 % of the *ejidal* territory.

Forest Recovery of the Nevado (SRBN) Subarea

It gathers fragmented pine forests (*Pinus hartwegii* Lindl.) with crown coverings of less than 50 %. Here, forest management for the protection, conservation, restoration and preservation of ecosystems and forest sanitation would be developed (Conanp, 2014). It is a small portion to the northwest of the *ejido*, with 136.4 ha, corresponding to 6.4 % of the *ejidal* territory.

Sustainable Use of Natural Forest Resources (SASRNF) Subarea

This subarea appears in the Conservation and Management Program of the APFF. They are dense and semi-dense forests of pine and fir in slopes smaller than 40 % where sustainable use will be allowed. In these areas are allowed the opening of logging gaps, removal of dead timber and felled by natural phenomena for self-consumption, forest management,

Subzona Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales Forestales (SASRNF)

Esta subzona aparece en el Programa de Conservación y Manejo del APFF. Reúne a bosques densos y semidensos de pino y oyamel en pendientes menores a 40 % donde se permitirá el aprovechamiento sustentable. En estas áreas se autorizará la apertura de brechas de saca, remoción de madera muerta en pie y derribada por fenómenos naturales para autoconsumo, manejo forestal, mantenimiento de brechas y caminos (siempre y cuando no se amplíen ni pavimenten), pago por servicios ambientales y programas de apoyo federales y estatales de conservación, protección, y restauración de recursos naturales, y turismo de bajo impacto ambiental (Conanp, 2014). Se ubica en la parte oeste del ejido, con una dirección del norte al sur con una superficie de 689 ha, que corresponde a 32.7 % del territorio ejidal.

Subzona Aprovechamiento Sustentable de los Ecosistemas

Esta subzona es una franja de 74.6 ha equivalente 3.5 % del territorio ejidal, que corre de sur a norte en la parte central y este del ejido, en la que hay relictos de vegetación primaria como bosques de pino-oyamel, pino, pino-encino y bosque de galería. Así mismo, en esta zona hay una brecha de acceso hacia el Cerro San Antonio que es la parte oeste del APFF Nevado de Toluca. En esta área se pueden realizar actividades productivas de bajo impacto ambiental, así como de restauración. Se permiten plantaciones forestales comerciales con especies nativas, manejo forestal y turismo de bajo impacto ambiental (Conanp, 2014).

Subzona Aprovechamiento Sustentable de Recursos Naturales

Esta zona de 523 ha, que equivalen a 24.8 % del ejido, corresponde a dos polígonos en la parte sureste y el extremo suroeste del ejido, se distribuyen bosques de coníferas en los que predominan especies de *Pinus* y de *Abies*, así como algunas hojosas. Aquí se conceden actividades productivas de bajo impacto ambiental y de restauración, al igual que manejo forestal y del fuego, establecimiento de UMA y turismo de bajo impacto ambiental (Conanp, 2014).

Escenario del uso de recursos forestales bajo el nuevo marco normativo

Potencialmente de la Subzona de Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Forestales del APFF se podrá incorporar 689 ha al manejo forestal, puesto que con el cambio de decreto de Parque Nacional a Área de Protección

maintenance of gaps and roads (provided they are not expanded or paved), payment for environmental services and Federal and state support programs for conservation, protection and restoration of natural resources, and low environmental impact tourism (Conanp, 2014). It is located in the western part of the *ejido* running from north to south with an area of 689 ha, which corresponds to 32.7 % of the *ejidal* territory.

Sustainable Use of Ecosystems Subarea

This subzone is a strip of 74.6 ha corresponding to 3.5 % of the *ejidal* territory, which runs from south to north in the central and eastern part of the *ejido*, where there are relics of primary vegetation such as pine-fir, pine, pine-oak and gallery forest. Also, in this area there is a breach of access to the *Cerro San Antonio* that belongs to the western part of the *Nevado de Toluca* APFF. In this area, productive activities of low environmental impact, as well as restoration can be carried out. Commercial forest plantations with native species, forest management and tourism with low environmental impact are allowed (Conanp, 2014).

Sustainable Use of Natural Resources Subarea

This area of 523 ha, which is 24.8 % of the *ejido*, is equivalent to two polygons in the southeast and southwest end; here coniferous forests are displayed in which *Pinus* and *Abies* species, as well as some broadleaves predominate. Productive activities with low environmental impact and restoration are granted, as well as forest and fire management, establishment of UMA and tourism with low environmental impact (Conanp, 2014).

Forest resources use scenario under the new regulatory framework

From the Sustainable Use of Natural Forest Resources (SASRNF) Subarea, potentially, 689 ha could be put under forest management, since from the change of the national park decree to *Flora and Fauna* Protection Area such options are opened; the main consequences of it would be:

An increment in the land under forest management with which the forest could get better when applying forestry labors of forest masses maintenance that at present have not been made as *ejidatarios* have not got interested in doing so as they



de Flora y Fauna se abren dichas posibilidades; las principales repercusiones serían:

Un incremento en la superficie bajo manejo, con lo que se podría mejorar el bosque al aplicar labores silvícolas de mantenimiento de la masa arbórea que actualmente no se han realizado por desinterés de los ejidatarios al considerarlo como un territorio que ha sido restringido, así como tener un mayor control de las plagas en el APFF.

Una disminución de la disposición de áreas de bosques no incorporadas al mercado y de donde los habitantes de SFO se han abastecido de madera para autoconsumo por usos y costumbres.

Una mayor venta de madera en pie, por lo que, aunque aumentarán los ingresos, los principales beneficiarios serán los contratistas y prestadores de servicios relacionados con el aprovechamiento forestal, mientras los ejidatarios no se incorporen a las actividades de manejo y transformación de los productos forestales.

Los recursos forestales no maderables recibirán una mayor presión, como resultado del proceso de corta y extracción de la madera.

Conclusiones

Se ha permitido el mantenimiento del SRFUC como un elemento importante para la cohesión y reproducción social en San Francisco Oxtotilpan (SFO).

Las restricciones establecidas por el Área Natural Protegida Nevado de Toluca (ANPNT) al aprovechamiento de recursos forestales en el ejido SFO han retrasado el desarrollo de una cultura forestal, mismas que no han sido el factor principal para el acceso reducido del ejido a la cadena productiva y a la formación de una cultura empresarial comunitaria. La posibilidad del incremento de superficie bajo aprovechamiento forestal con el cambio de categoría será limitada, pues no es una apertura total y estará sometida a un amplio marco regulatorio en materia ambiental y forestal, por lo que el aprovechamiento puede ser orientado hacia la sustentabilidad en beneficio tanto del bosque, como de sus dueños.

El cambio de categoría del ANPNT va a generar cambios cualitativos y cuantitativos en los flujos y procesos en el SRFUC-SFO, por lo que se abre la oportunidad de fortalecer la cultura silvícola Matlatzinca y empresarial comunitaria, con el ánimo de no generar presiones que puedan polarizar al ejido, ni al núcleo agrario con las otras instituciones comunitarias.

La participación femenina es de poco menos de un tercio en la asamblea ejidal y bienes comunales, lo que puede ser

considerar it a restricted territory, as well as to have a greater control of forest plagues in the APFF.

A lower use of forest lands not included in the market and from which the inhabitants of SFO have traditionally taken timber for self-consumption.

A higher timber on foot sale, and therefore an income increase, where the main beneficiaries will be the contractors and service providers related to forest harvest, as far as the *ejidatarios* that do not get involved in the management and transformation of timber products.


Non-timber resources will have a greater pressure, as a result of wood cutting and extraction.

Conclusions

The maintenance of SRFUC has been allowed as an important component for the integration and social reproduction in San Francisco Oxtotilpan (SFO).


The established restrictions by the *Nevado de Toluca* Protected Natural Area (ANPNT) to harvest forest resources in SFO *ejido* have retarded the development of a culture related to the woods, which, by themselves, have not been the major factor to the small access of the *ejido* to the productive chain and the construction of a community enterprise culture. The possibility of the increment of land under forest harvest with the category change will be limited, as it is not a complete opening and will be subjected to a broad regulatory framework in environmental and forest matters, and therefore, harvest could be oriented towards sustainability in the benefit of the forest and their owners.

The category change of the ANPNT will produce qualitative and quantitative differences in the flows and processes in SRFUC-SFO, thus opening the chance to strengthen the forestry Matlatzinca culture and of the community enterprise, in order not to start pressures that could polarize the *ejido*, or the agrarian nucleus with the rest of the community institutions.

Female contribution is less than a third in the ejidal assembly and communal goods, which could be a sign of the feminization process, at least in decision taking. This implies to think the policies of forest management, conservation and environmental service payment with a gender perspective, inclusive, fair and sustainable. 

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Conacyt for the financial supported granted to the Project "Tenencia de la tierra, uso y conservación de los recursos naturales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", 3503/2013CHT. Likewise, to Fabián Gerardo Moya García for making the maps; to Monserrat

una señal del proceso de feminización, al menos en la toma de decisiones. Ello implica pensar las políticas de manejo forestal, conservación y de pago de servicios ambientales con una perspectiva de género, incluyente, justo y sustentable. 

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el financiamiento otorgado al proyecto "Tenencia de la tierra, uso y conservación de los recursos naturales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", 3503/2013CHT. Igualmente, a Fabián Gerardo Moya García por la elaboración de los mapas; a Monserrat Estefany Alvarado Jaramillo y Azucena López Martínez por su apoyo en trabajo de campo y a Regina Trujillo Marín por la revisión del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Antonio De la Cruz Hernández: trabajo de campo, elaboración del manuscrito en lo relativo al resumen, introducción, resultados, discusión y conclusiones, diseño de figuras y mapas; Víctor Ávila Akerberg: elaboración del manuscrito en lo relativo al abstract, resultados, discusión, conclusiones, figuras, revisión general y aplicación de correcciones; María Gladys Rivera Herrejón: apoyo en resultados y discusión del escrito; Ivonne Vizcarra Bordi: revisión y sugerencias del manuscrito en lo relativo al título, resultados, discusión y conclusiones.

Referencias

Álvarez I., P. 2006. Los recursos de uso común en México: un acercamiento conceptual. *Gaceta Ecológica* 80: 5-17.

Arnstein S., R. 1969. A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners* JAIP 35(4): 216-224.

Bautista-Calderón, L. 2007. "Las vedas forestales en el México post-revolucionario". Tesis de maestría en Estudios Regionales. Instituto de Investigaciones José María Luis Mora. México, D.F., México. 186 p.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Apoyos 2013. www.conafor.gob.mx/aopoyos/index.php/inicio/app.apoyos#/detalle/2013/23 (6 de noviembre de 2015).

Gaceta de Gobierno, 2013. Solicitudes factibles del Programa para el pago por Servicios Ambientales Hidrológicos 2013. *Gaceta de Gobierno* del 5 de noviembre de 2013. Toluca, Edo. de Méx. legislación.edomex.gob.mx/sites/legislación.edomex.gob.mx/files/files/vigentes/nov053.PDF (6 de noviembre de 2015).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) 2014. Programa de Manejo del Área de Protección de Recursos Naturales Zona Protectora Forestal Los Terrenos Constitutivos de las Cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec, México para consulta pública de conformidad con el artículo 65 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Semarnat.

Gamboa M., C. y M. Gutiérrez S. 2008. "Derechos Indígenas" Estudio Teórico Conceptual, de Antecedentes e Iniciativas, presentadas en la LX Legislatura y en los Dos Primeros Años de Ejercicio de la LX Legislatura. Primera Parte. Cámara de Diputados. LX Legislatura. México, D. F., México. 115 p.

García F., E. 2006. Conservation from below: Sociocological system in natural protected areas in the Yucatan Peninsula, Mexico. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales. Instituto de Ciencia y Tecnologías Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España. 252 p.

Estefany Alvarado Jaramillo and Azucena López Martínez for their support in field work and to Regina Trujillo Marín for reviewing the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Contribution by autor

José Antonio de la Cruz Hernández: field work, writing of the manuscript in regard to the resumen, introduction, results, discussion and conclusions, figures design and maps; Víctor Ávila Akerberg: writing of the manuscript in regard to the abstract, results, discussion, conclusions, figures, general review and corrections; María Gladys Rivera Herrejón: support in the results and discussion sections of the manuscript; Ivonne Vizcarra Bordi: review and suggestions to the manuscript in regard to the title, results, discussion and conclusions.

End of the English version



García-Frapolli, E y V. M. Toledo M. 2008. Evaluación de sistemas socioecológicos en áreas naturales protegidas: Un instrumento desde la economía ecológica. *Argumentos, Nueva Época* Año 21 (56): 103-116.

Kawulich, B. 2006. La observación participante como método de recolección de datos. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research* 6 (2), Art. 43. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0502430> (29 de enero de 2015).

Merino P., L. y E. Martínez A. 2015. A vuelo de pájaro. Las condiciones de las comunidades con bosques templados en México. *Conabio, México, D. F., México*. pp. 188.

Ostrom, E. 1990. El gobierno de los bienes comunes. FCE, UNAM, IIS, CRIM. México, D. F., México. 395 p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2016. Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del Programa de Manejo del área natural protegida con categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, *Diario Oficial de la Federación* del 21 de octubre 2016. Ciudad de México, México. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5457780&fecha=21/10/2016 (30 de octubre de 2016).

Thomé O., H., 2016. Turismo rural y sustentabilidad. El caso del turismo micológico en el Estado de México. *In: Carreño, M. y G. V. A Yaneth. (coords.). Ambiente y patrimonio cultural. UAEM, Toluca, Edo. de Méx., México*. pp. 43-69

Walker, B., S. Carpenter, J. Anderies, N. Abel, G. S. Cumming, M. Janssen, L. Lebel, J. Norberg, G. D. Peterson and R. Pritchard. 2002. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology* 6(1): 14.





Artículo / Article

Selección de árboles semilleros de *Juglans pyriformis* Liebm. en poblaciones naturales de Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz

Juglans pyriformis Liebm. seed tree selection in natural populations of Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz

Eunice Ortiz Muñoz¹, Celia Cecilia Acosta Hernández¹, Pascual Linares Márquez¹, Zoylo Morales Romero² y Virginia Rebolledo Camacho³

Resumen

Una estrategia de conservación *in situ* para especies amenazadas como *Juglans pyriformis* puede ser la selección de árboles semilleros, la cual garantiza la regeneración natural, coleccionar semilla de procedencia conocida para el establecimiento de plantaciones de conservación y mantener la estructura del bosque. Con el objetivo de seleccionar árboles semilleros de *J. pyriformis* en fragmentos de Bosque Mesófilo de Montaña en Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz, se realizó un muestreo no probabilístico por cuota para caracterizar fenotípica y dasométricamente 20 árboles por población. Se recolectaron 48 frutos de cada uno y se obtuvieron las semillas, que se germinaron en invernadero, bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar con unidad experimental de 12 semillas por bloque. Durante 133 días se registró el número de semillas germinadas por árbol. En las plántulas se midió la altura, diámetro cuello/raíz, y se obtuvo el peso seco para evaluar su calidad, mediante el índice de Dickson. Con base en la calificación de los árboles, el vigor germinativo de las semillas y la calidad de la plántula, los individuos fueron clasificados en dos categorías. La Categoría I, agrupó ejemplares con características fenotípicas y dasométricas sobresalientes, valores altos en calidad de semilla y de plántula. En la Categoría II se incluyeron árboles con valores menores, respecto a los de la I. En la población de Coatepec se identificaron nueve árboles semilleros Categoría I; y 11 Categoría II. En la población de Coacoatzintla se identificaron dos árboles semilleros Categoría I; y 18 Categoría II.

Palabras clave: Calidad de planta, calidad de semilla, caracterización dasométrica, caracterización fenotípica, índice de Dickson, vigor germinativo.

Abstract

A potential *in situ* preservation strategy for endangered species like *Juglans pyriformis* is to select seed trees --whereby natural regeneration is ensured--, collect seeds from known, reliable sources for the establishment of preservation plantations, and maintain the structure of the forest. With the purpose of selecting *J. pyriformis* seed trees in scattered areas of the Montane Cloud Forest in Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz, a non-probabilistic quota sampling procedure was carried out in order to determine the phenotypic and dasometric characteristics of 20 trees per population. 48 fruits were collected from each, and the seeds were collected and germinated in a greenhouse under a totally random block experimental design of 12 seeds per block. The number of seeds germinated per tree was recorded during 133 days. The height and the root neck diameter were measured in the seedlings, and the dry weight was estimated, using Dickson's index, in order to assess their quality. Based on the classification of the trees, the germinative vigor of the seeds and the quality of the seedlings, the individuals were classified into two categories. Category I grouped specimens with outstanding phenotypic and dasometric characteristics and high values for seed and seedling quality. Category II included trees with lower values than those of I. Nine seed trees of Category I and eleven of Category II were identified in Coatepec. Two seed trees belonging to Category I, and eighteen of Category II were identified in Coacoatzintla.

Key words: Plant quality, seed quality, dasometric characterization, phenotypic characterization, Dickson's index, germinative vigor.

Fecha de recepción/Reception date: 16 de octubre de 2015; Fecha de aceptación/Acceptance date: 2 de noviembre de 2016.

¹ Facultad de Biología. Universidad Veracruzana. Campus, Xalapa. Veracruz. México. Correo-e: eunij_14@hotmail.com

² Facultad de Estadística e Informática. Universidad Veracruzana. Campus Xalapa. México.

³ Instituto de Investigaciones Forestales (INIFOR). Universidad Veracruzana. Campus Xalapa. México.

Introducción

Juglans pyriformis Liebm. (Juglandaceae), comúnmente llamado cedro-nogal, es una especie endémica que forma parte del estrato medio-alto del bosque mesófilo de montaña en los estados de Hidalgo, Oaxaca y Veracruz; en altitudes entre los 1 200 y 1 600 m (Narave, 1983; Luna-Vega *et al.* 2006); y de acuerdo a la NOM-059 está registrada como amenazada (Semarnat, 2010).

En Veracruz, el cedro-nogal es muy valioso, ya que su madera de gran belleza y dureza se utiliza para la fabricación de muebles finos e instrumentos musicales, además se le emplea para cercos vivos o sombra en cafetales; por lo cual ha sido sobreexplotada (Luna *et al.* 2006). Este hecho ha contribuido a la disminución de sus poblaciones, pero también ha fomentado el establecimiento de plantaciones puras o mixtas con fines comerciales; de tal manera que, en el estado, a partir del 2001 se establecieron aproximadamente 400 ha, con apoyos del Programa de Plantaciones Forestales (PRODEFOR) que impulsa la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2008).

Lo anterior ha generado la demanda de planta de *J. pyriformis*, por lo que en algunos viveros forestales de la región de Xalapa, se reproduce la especie a partir de semilla procedente de las poblaciones naturales, aún presentes en los fragmentos de Bosque Mesófilo de las localidades de Coatepec, Huatusco, Coacoatzintla y San José Buenavista. Sin embargo, dicho germoplasma se obtiene de frutos recolectados de forma masiva en el suelo, sin una selección de los árboles semilleros, ni conocimiento del comportamiento en vivero. Esto puede tener repercusiones, ya que a largo plazo la calidad de las semillas se refleja en los rendimientos y desarrollo en campo de los árboles, y la alta susceptibilidad a plagas, enfermedades y cambios ambientales. A corto plazo, las implicaciones se reflejan en los costos de producción y manejo de la semilla (Jardel, 2006).

La disposición de germoplasma a partir de una fuente identificada, y procedente de masas forestales naturales es el punto de partida para que la recolecta tenga una amplia base genética, y una estrategia para preservar el acervo genético de la especie; con ello se asegura una mayor adaptabilidad y sobrevivencia de las plántulas producidas en vivero, cuando son llevadas a condiciones ecológicas semejantes a las de la región de origen (Salazar y Boshier, 1989; Carrillo y Ávila, 1979).

Por lo antes expuesto, se planteó el presente trabajo con el objetivo de seleccionar árboles semilleros de *J. pyriformis* en fragmentos de Bosque Mesófilo de Montaña de las poblaciones naturales en Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz; con base en sus características fenotípicas, y calidad de la semilla y de la plántula en vivero.

Introduction

Juglans pyriformis Liebm. (Juglandaceae), commonly known as cedar-walnut, is an endemic species that grows in the medium-high stratum of the montane cloud forest in the states of Hidalgo, Oaxaca and Veracruz, at altitudes between 1 200 and 1 600 m (Narave, 1983; Luna-Vega *et al.* 2006); according to NOM-059, it is registered as endangered (Semarnat, 2010).

In Veracruz, cedar-walnut is very valuable, as its wood -of great beauty and hardness- is used for making fine furniture and music instruments; furthermore, it is used as living fences or for shade in coffee plantations, and for this reason it has been overexploited (Luna *et al.* 2006). This fact has contributed to the reduction of its populations, but has also promoted the establishment of pure or mixed plantations with commercial purposes. Thus, since 2001, it was established in approximately 400 hectares in the state, with the support of the Forest Plantation Program (*Programa de Plantaciones Forestales*, PRODEFOR) sponsored by the National Forestry Commission (*Comisión Nacional Forestal*) (Conafor, 2008).

This endeavor has generated the demand of the *J. pyriformis* plant; therefore, in certain forest nurseries of the Xalapa region, it is reproduced from seeds of natural populations still present in scattered areas of the Montane Cloud Forest of Coatepec, Huatusco, Coacoatzintla and San José Buenavista. However, this germoplasm is obtained from fruits that are massively collected from the ground, as in the long term the quality of the seeds is reflected in the yield and the in-field development of the trees, as well as in their high susceptibility to pests, diseases and environmental changes. In the short term, the implications are reflected in the seed production and handling costs (Jardel, 2006).

The obtainment of germoplasm from an identified source, and from natural forest masses allows the collection to have a broad genetic base and a strategy for the preservation of the genetic pool of the species. This will ensure higher levels of adaptability and survival rates in plants produced in a nursery when taken to similar ecological conditions to those of the region of origin (Salazar and Boshier, 1989; Carrillo and Ávila, 1979).

Thus, the present work was proffered for the purpose of selecting seed trees in certain areas of the Montane Cloud Forest from the natural populations in Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz, based on their phenotypic characteristics and in the quality of the seeds and of the nursery-grown seedlings.



Materiales y Métodos

Los árboles evaluados de *Juglans pyriformis* se encuentran en áreas naturales dentro de las inmediaciones de los municipios de Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz (Figura 1).

Materials and Methods

The assessed *Juglans pyriformis* trees are located in natural areas within the municipalities of Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz (Figure 1).

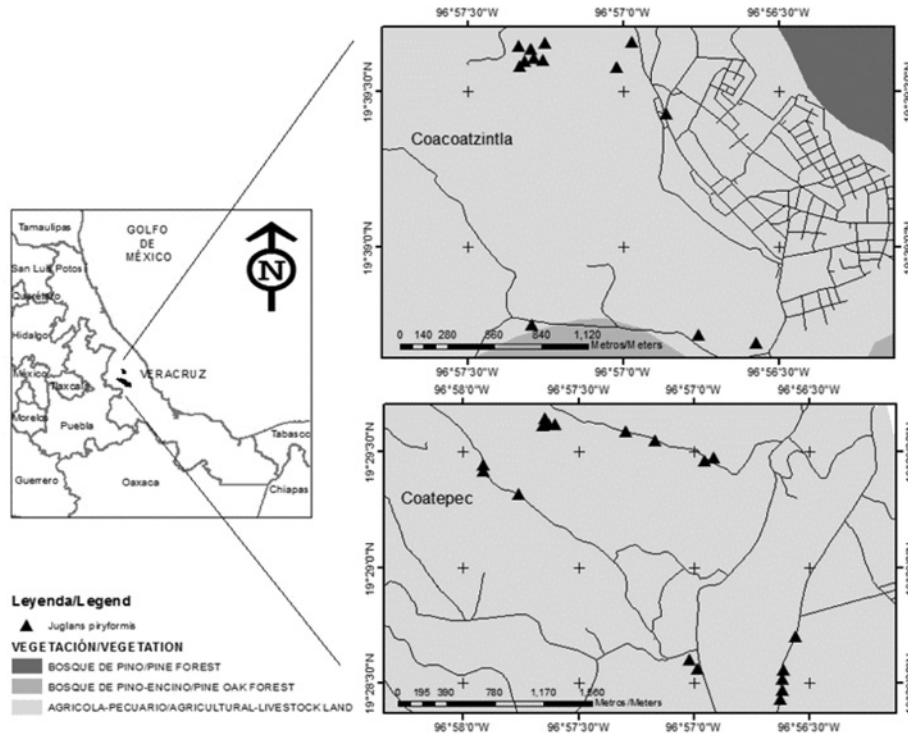


Figura 1. Localización de árboles de *Juglans pyriformis* Liebm. en las poblaciones naturales en Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz.

Figure 1. Location of *Juglans pyriformis* Liebm. trees in the natural populations of Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz.

La población de árboles de cedro-nogal de Coatepec se localiza en un intervalo altitudinal de 1 200 a 1 400 m; está formada por árboles dispersos en pequeños relictos de Bosque Mesófilo de Montaña y cafetales. El clima de la región es templado-húmedo regular, con lluvias abundantes en verano y principios de otoño. Temperatura media anual de 19.9 °C (máx. 35.8°C, mín. 4 °C) y precipitación anual de 1 764.9 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014a).

The cedar-walnut tree population of Coatepec is located at an altitude of 1 200 to 1 400 m; it is made up of trees scattered in small relicts of the Montane Cloud Forest and coffee plantations. The climate in the region is temperate-humid-regular, with abundant rains in the summer and early fall. The mean annual temperature is 19.9 °C (max. 35.8 °C, min. 4 °C), and the annual precipitation is 1 764.9 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014a).

Los individuos de cedro-nogal de Coacoatzintla, se localizan a una altitud entre los 1 200 y 1 600 m. Esta población está formada por árboles dispersos en un fragmento de Bosque Mesófilo de Montaña (Figura 1). El clima corresponde al templado-húmedo regular, con lluvias abundantes en verano y principios de otoño. Temperatura media anual de 17.5 °C (máx. 37 °C, mín. 7.5 °C), y precipitación anual de 1 606.7 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014b).

Cedar-walnut individuals of Coacoatzintla are located at an altitude between 1 200 and 1 600 m. The population is constituted by trees scattered in a fragment of the Montane Cloud Forest (Figure 1). The climate is regular temperate-humid, with abundant rains in summer and early fall. Mean annual temperature of 17.5 °C (max. 37 °C, min. 7.5 °C), and an annual precipitation of 1 606.7 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014b).

De septiembre a octubre de 2012 se recorrieron ambas poblaciones para evaluar 20 árboles, con base en dos criterios:

From September to October, 2012, both populations were toured in order to evaluate 20 trees based on two criteria:

1) ser árboles maduros y en fructificación; 2) estar a una distancia igual o mayor a 50 m uno del otro, para evitar el efecto de coancestría (Acosta-Hernández *et al.*, 2011a).

La caracterización fenotípica se hizo con base en la matriz propuesta por Samaniego (2002), la cual es una valoración cualitativa de seis parámetros que califican forma de fuste, altura de bifurcación, dominancia del eje principal, ángulo de ramas, forma de copa, diámetro de copa, y permite determinar la idoneidad de los individuos como árboles semilleros, asignándoles un puntaje a cada uno de los parámetros evaluados. Asimismo, se registró la altura total del árbol con un clinómetro (Sunntu®), y el diámetro a la altura del pecho (DAP = 1.30 m) con un longímetro (Truper®) de 3 m. Cada individuo fue georreferenciado, con un GPS (Garmin® map 60 csx), e identificado en secuencia numérica con pintura de spray. Por árbol, se recolectaron 48 frutos (960 frutos por población) y se trasladaron en bolsas de tela etiquetadas con el número de árbol y población, para su posterior beneficio y obtención de semillas.

El ensayo de germinación, con diseño experimental de cuatro bloques completos al azar y 12 semillas por unidad experimental, se estableció el 19 de noviembre del 2012 en el área del vivero adyacente al invernadero del Campus para la cultura, las artes y el deporte de la Universidad Veracruzana, sede Xalapa (USBI-Xalapa), ubicado en las coordenadas 19°30'30" latitud N, 96°55'30" longitud O, a una altitud de 1 300 m.

Las semillas se sembraron en tubetes de plástico negro, rígido de 300 mL que contenían sustrato con tierra de monte y "tepezil" en proporción 1:1. Antes y después de la siembra fueron tratadas con una solución de Captan de 10g L⁻¹.

La germinación se registró durante 133 días, después de la fecha de siembra (19 semanas). Las variables registradas fueron: fecha de siembra, inicio de la germinación (IG = 5 % de semilla germinadas por árbol), fecha de emergencia de plántula y número de semillas germinadas por árbol, ésta última de forma diaria, a partir de la primera semilla germinada.

La calidad de las plántulas se evaluó a partir de la aparición de las hojas verdaderas durante 3 meses (abril, mayo y junio); se registró altura (cm) del cuello de la plántula a la yema apical, con un flexómetro (Truper®) de 3 m; y diámetro (mm) a nivel de cuello/raíz de tallo, con un vernier digital (Mitutoyo®), en 12 plántulas por bloque (tres plántulas por unidad experimental) seleccionadas al azar.

Análisis de datos

Caracterización dasométrica y fenotípica de árboles

Con base en la valoración cualitativa de los parámetros propuestos en la matriz de Samaniego (2002), se realizó la

the trees should 1) be mature and fruiting; 2) stand at a distance equal or above 50 m from each other, in order to avoid the effect of co-ancestry (Acosta-Hernández *et al.*, 2011a).

The phenotypic characterization was based on the matrix proposed by Samaniego (2002), which is a qualitative evaluation of six parameters by which to assess the stem shape, forking height, dominance of the main axis, branch angle, crown shape and crown diameter, and makes it possible to determine the suitability of the individuals as seed trees, assigning a score to each of the assessed parameters. Furthermore, the total height of the tree was measured using a (Sunntu®) clinometer, and the diameter at breast height (DBH = 1.3 m) using a 3 m (Truper®) longimeter. Each individual was georeferenced using a (Garmin® map 60 csx) GPS, and identified in a numerical sequence with spray paint. 48 fruits per tree (960 fruits per population) were collected and transferred in cloth bags labeled with the tree number and population for their subsequent exploitation and the obtainment of seeds.

The germination assay—with an experimental design consisting of four complete random blocks and 12 seeds per experimental unit—was established on November 19, 2012 in the nursery area adjoining the greenhouse in the Campus for the arts, culture and sports of Universidad Veracruzana in Xalapa (USBI-Xalapa), located at the coordinates 19°30'30" N and 96°55'30" W, at an altitude of 1 300 masl.

The seeds were sown in black rigid plastic 200 mL tubes containing substratum with earth and "tepezil" in a 1:1 proportion. Before and after sowing, they were treated with a 10 g L⁻¹ Captan solution.

The germination was recorded during 133 days (19 weeks) after sowing. The registered variables were: sowing date, onset of germination (OG = 5 % of the seeds germinated per tree), date of emergence of the seedling and number of germinated seeds per tree, on a daily basis, since the germination of the first seed.

The quality of the seedlings was assessed during three months (April, May and June) from the time of emergence of true leaves; the height (cm) from the neck of the seedling to the apical shoot, with a 3 m (Truper®) flexometer, and diameter (mm) at the root neck, using a (Mitutoyo®) digital vernier caliper, in 12 randomly selected seedlings per block (three seedlings per experimental unit).





sumatoria para obtener el puntaje por árbol y clasificarlo de acuerdo a sus características fenotípicas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de las características fenotípicas de los árboles y puntaje para su clasificación, según la valoración en campo. Modificado de Samaniego (2002).

Características fenotípicas	Puntaje	Clase	Árboles semilleros
Árboles con características sobresalientes: fuste recto, no bifurcados, dominancia completa del eje principal, ángulo de inserción de las ramas de 60° a 90°, copa dominante.	18 a 24	1	SI
Árboles con características medias: fuste ligeramente torcido, bifurcación superior, dominancia parcial del eje principal, ángulo de inserción de las ramas de 30° a 60°, copa promedio.	9 a 17	2	SI
Árboles con características indeseables: fuste torcido, bifurcado en el 1/3 medio o inferior, ángulo de inserción de las ramas de 0° a 30°, copa pequeña.	≤ 8	3	NO

Table 1. Description of the phenotypic characteristics of the trees and scores for their classification according to the in-field assessment. Modified by Samaniego (2002).

Phenotypic characteristics	Score	Class	Seed trees
Trees with outstanding characteristics: straight unforked stem, complete dominance of the main axis, 60° to 90° branch insertion angles, dominant crown.	18 to 24	1	YES
Trees with medium characteristics: slightly gnarled stem, high forking, partial dominance of the main axis, 30° to 60° branch insertion angles, average crown.	9 to 17	2	YES
Trees with undesirable characteristics: gnarled stem, forking at the middle or lower third, 0° to 30° branch insertion angles, small crown.	≤ 8	3	NO

Evaluación de germinación

Con las variables en vivero se estimaron los siguientes parámetros (Piedrahíta, 1998; López y Piedrahíta, 1998): potencia germinativa (PG %), germinación diaria media (GDM), inicio de la germinación (IG), tiempo medio de germinación (TMG) y vigor germinativo o Índice de Czabator (VG), mediante la expresión:

$$VG = VM \times GDM$$

Donde:

VM = Corresponde al cociente máximo que se obtiene al dividir cada una de las germinaciones diarias acumuladas por el correspondiente número de días para alcanzarla

Para fines del presente trabajo, la calidad de las semillas se definió con base en los intervalos de vigor germinativo

Data analysis

Dasometric and phenotypic characterization of trees

Based on the qualitative assessment of the parameters proposed in Samaniego's matrix (Samaniego, 2002), the corresponding values were added in order to obtain the score per tree and to classify each tree by its phenotypic characteristics (Table 1).

Germination assessment

The following parameters were estimated for the nursery-grown variables (Piedrahíta, 1998; López and Piedrahíta, 1998): germinative potency (GP %), mean daily germination (MDG), onset of the germination (OG), mean germination time (MGT) and germinative vigor or Czabator's Index (GV), using the expression:

$$GV = MV \times MDG$$

(Índice de Czabator) como baja (<0.169), media (0.170-0.340) y alta (≥0.341); y a la potencia germinativa (PG %).

Evaluación de plántulas

Se estimó el Índice de Dickson (ID) con la fórmula (Olivo y Buduba, 2006):

$$D = \frac{\text{Peso total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro tallo (mm)}} + \frac{\text{Peso seco parte aérea (g)}}{\text{Peso seco parte radicular (g)}}}$$

La calidad de la planta se clasificó a partir de los intervalos de calidad para el índice de Dickson como baja (<0.2), media (0.3-0.4) y alta (≥0.5) establecidos por Sáenz *et al.* (2010) para evaluar la planta producida en nueve viveros del estado de Jalisco.

Resultados y Discusión

Clasificación fenotípica y dasométricamente de árboles

En función de la valoración fenotípica, los árboles de *J. pyriformis*, de ambas poblaciones se agruparon en las clases 1 y 2, lo que indica que pueden ser considerados semilleros. En la población de Coatepec se identificó un mayor número de individuos Clase 1, los cuales tienen características fenotípicas sobresalientes, por su altura y diámetro son dominantes y forman parte del dosel superior. Los árboles de la Clase 2 son codominantes y presentan características fenotípicas medias (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de árboles de *Juglans pyriformis* Liebm. de las poblaciones de Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC), con base en la valoración fenotípica, altura y diámetro ± Error estándar.

Población	Clase	Valoración fenotípica	Diámetro medio	Altura media	Árbol	Total
CT	1	18 - 26	59.19 ± 19.3	21.41 ± 6.6	1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 17 y 20	13
	2	11 - 17	35.83 ± 16.4	15.40 ± 3.2	3, 8, 9, 11, 16, 18 y 19	7
CC	1	18 - 24	49.16 ± 7.59	17.99 ± 6.0	1, 2, 3, 8, 9, 10, 12, 14 y 19	9
	2	12 - 17	52.52 ± 11.5	17.53 ± 5.2	4, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16, 17, 18 y 20	11

Where:

MV = The maximum coefficient obtained by dividing each one of the accumulated daily germinations by the corresponding number of days that it took

For the purposes of the present work, the quality of the seeds was defined, based on the germinative vigor intervals (Czabator's Index), as low (<0.169), medium (0.170-0.340) and high (≥0.341), and on the germinative potency (GP %).

Seedling assessment

Dickson's Index (DI) was estimated using the following formula (Olivo and Buduba, 2006):

$$D = \frac{\text{Total weight (g)}}{\frac{\text{Height (cm)}}{\text{Stem diameter (mm)}} + \frac{\text{Dry aboveground weight (g)}}{\text{Dry root weight (g)}}}$$

The quality of the plants was classified as low (<0.2), medium (0.3-0.4) and high (≥0.5), based on the quality intervals established by Sáenz *et al.* (2010) for Dickson's Index, in order to evaluate the plants produced in nine nurseries in the state of Jalisco.

Results and Discussion

Phenotypic and dasometric classification of trees

In terms of phenotypic assessment, *J. pyriformis* trees in both populations were grouped into Classes 1 and 2; this is an



Table 2. Classification of *Juglans pyriformis* Liebm. trees in the populations of Coatepec (CT) and Coacoatzintla (CC), based on their phenotypic assessment, height and diameter \pm Standard error.

Population	Class	Phenotypic assessment	Mean diameter	Mean height	Tree	Total
CT	1	18 - 26	59.19 \pm 19.3	21.41 \pm 6.6	1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 17 and 20	13
	2	11 - 17	35.83 \pm 16.4	15.40 \pm 3.2	3, 8, 9, 11, 16, 18 and 19	7
CC	1	18 - 24	49.16 \pm 7.59	17.99 \pm 6.0	1, 2, 3, 8, 9, 10, 12, 14 and 19	9
	2	12 - 17	52.52 \pm 11.5	17.53 \pm 5.2	4, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16, 17, 18 and 20	11

En la población de Coacoatzintla el número de árboles Clase 1 es menor y son codominantes, los de la Clase 2 son los dominantes. La altura y el diámetro medio de *J. pyriformis* en ambas poblaciones se están dentro de los intervalos de 4-25 m y 38-69 cm, respectivamente, citados para los grupos I y III por Acosta-Hernández *et al.* (2011b) en la población de Coacoatzintla.

Con la misma metodología, Acosta-Hernández *et al.* (2011a) caracterizaron 112 ejemplares de *J. pyriformis* en la población de Coacoatzintla, con el objetivo de determinar el nivel de variación morfológica. El análisis de los datos, mediante Componentes Principales (ACP) evidenció tres grupos, los cuales coincidieron con las clases propuestas por Samaniego (2002). Esa matriz, fue utilizada por Salan (2011) para seleccionar árboles semilleros de *Cedrela odorata* L, e identificó siete árboles clase tres y tres clase dos, en bosques nativos de la Región Amazónica Ecuatoriana.

El método de Samaniego (2002) se ha usado para evaluar fuentes semilleras previamente identificadas y seleccionadas de *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze, a fin de proponer su manejo con fines de mejoramiento genético.

Aletá *et al.* (2009) en su ensayo de 24 progenies de *J. regia* indican el ángulo de inserción de ramas, la ramificación y rectitud, poseen alta heredabilidad; características fenotípicas que fueron evaluadas en los individuos de *J. pyriformis*. Dichos autores señalan que el ángulo de inserción de ramas y la ramificación no presentan modificaciones en el tiempo, por lo que son variables confiables para la selección de árboles semilleros. En cuanto al diámetro y altura, Aletá *et al.* (2003) mencionaron que su expresión depende de las condiciones del sitio donde se establezcan las plántulas, es por ello que su observación, para la selección de árboles semilleros, debe tomarse con reserva.

indication that they may be considered to be seed trees. A higher number of Class I individuals--which stand out for their height and diameter, are dominant and are part of the higher canopy--were identified in Coatepec. On the other hand, Class 2 trees are codominant and have medium phenotypic characteristics (Table 2).

Class I trees are less numerous in the population of Coacoatzintla and they are codominant, while Class 2 trees are dominant. The height and mean diameter of *J. pyriformis* in both populations are within the ranges of 4-25 m and 38-69 cm, respectively, cited by Acosta-Hernández *et al.* (2011b) for groups I and III in the population of Coacoatzintla.

Using the same methodology, Acosta-Hernández *et al.* (2011a) characterized 112 *J. pyriformis* specimens in the population of Coacoatzintla, in order to determine the level of morphological variation. The data analysis, based on Main Components (MC), evidenced three groups, which coincided with the classes proposed by Samaniego (2002). This matrix was used by Salan (2011) to select *Cedrela odorata* L. seed trees and identified seven Class III and three Class II trees in the native forests of the Ecuadorian Amazon Region.

The method developed by Samaniego (2002) has been utilized to assess previously identified and selected *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze seed sources in order to promote their management for purposes of genetic enhancement.

In their assay of 24 *J. regia* offsprings, Aletá *et al.* (2009) point out that the branch insertion angle, branching and straightness are highly hereditary; the same phenotypic characteristics were evaluated in *J. pyriformis* individuals. According to these authors, the branch insertion angle and branching show no modifications through time, and therefore are reliable characteristics for the selection of seed trees. Aletá *et al.*

Calidad fisiológica de la semilla

Las semillas procedentes de Coatepec iniciaron su germinación en la cuarta semana, pero alcanzaron 5 % (IG) y 50 % (TMG) una semana después que las procedentes de Coacoatzintla; al final del ensayo (133 días), su potencia germinativa (PG %) fue mayor (Figura 2).

(2003) mentioned that the expression of diameter and height depends on the conditions of the site where the seedlings are established, and its observation as a criterion for the selection of seed trees must therefore be taken with reservations.

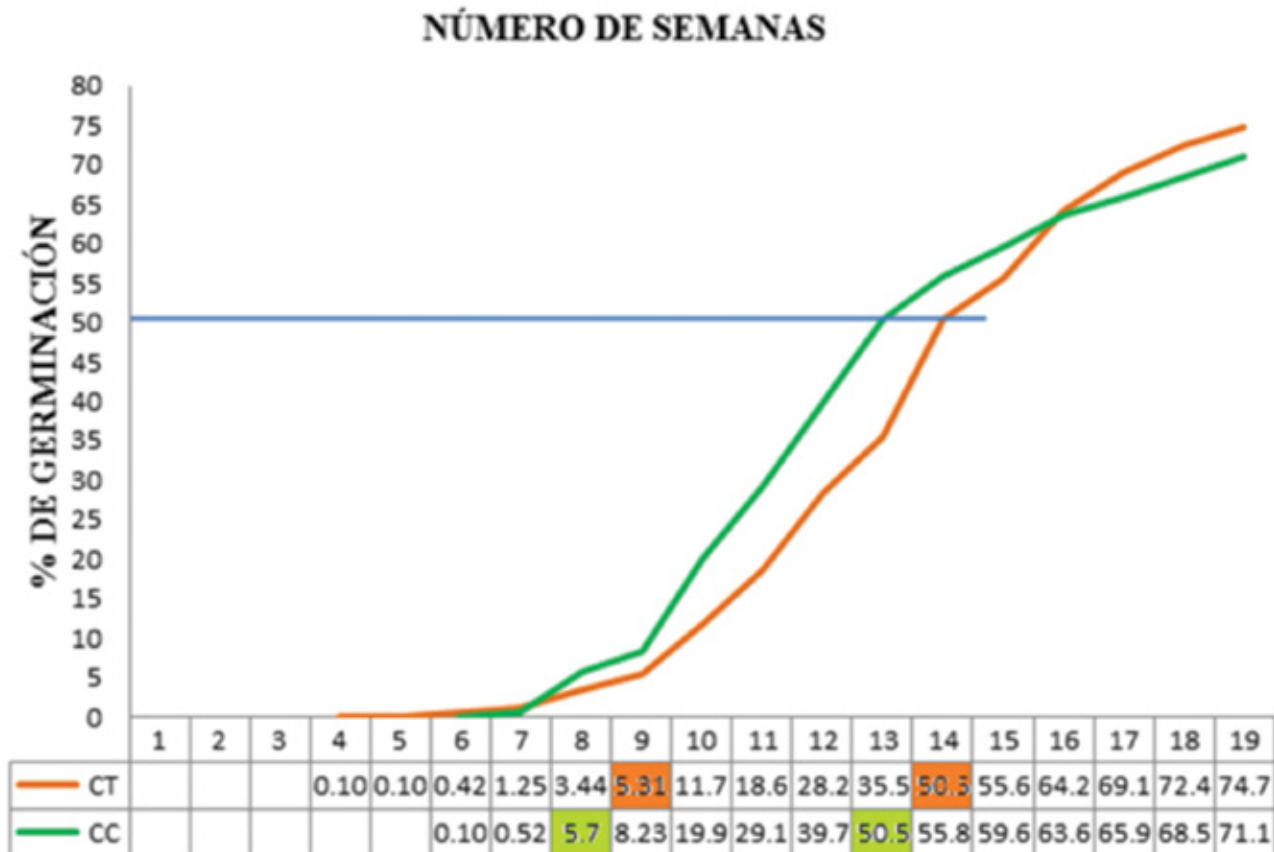


Figura 2. Porcentaje de germinación acumulado por semana de las semillas de *Juglans pyriformis* Liebm. de las poblaciones de Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC).

Figure 2. Germination percentage, accumulated per week, of *Juglans pyriformis* Liebm. seeds from the populations of Coatepec (CT) and Coacoatzintla (CC).

La PG por árbol/población fue mayor a 50 % en semilla de los árboles de Coatepec, nueve de ellos tuvieron valores cercanos o superiores a 80 %. En cambio para Coacoatzintla, solo 16 árboles presentaron semilla con un PG de 50 %, nueve registraron valores iguales o cercanos a 80 % (Figura 3 A y B).

De acuerdo a los intervalos de calidad de la semilla establecidos (Cuadro 3), en la población de Coatepec se identificaron 12 individuos de calidad de semilla alta y ocho con calidad media. En la población de Coacoatzintla se encontraron 12 árboles con calidad de semilla alta; cuatro con calidad media e igual número con calidad baja.

Physiological quality of the seed

Seeds from Coatepec began germinating in the fourth week, but they reached a GI of 5 % (GI) and a MGT of 50 % one week after those from Coacoatzintla; at the end of the assay (133 days), they had a higher germinative potency (GP %) (Figure 2).

The GP per tree/population was over 50 % in the seeds of individuals from Coatepec; nine of these had values near or above 80 %. Conversely, only the seeds of 16 trees from Coacoatzintla had a GP of 50 %; nine registered values near or equal to 80 % (Figure 3 A and B).

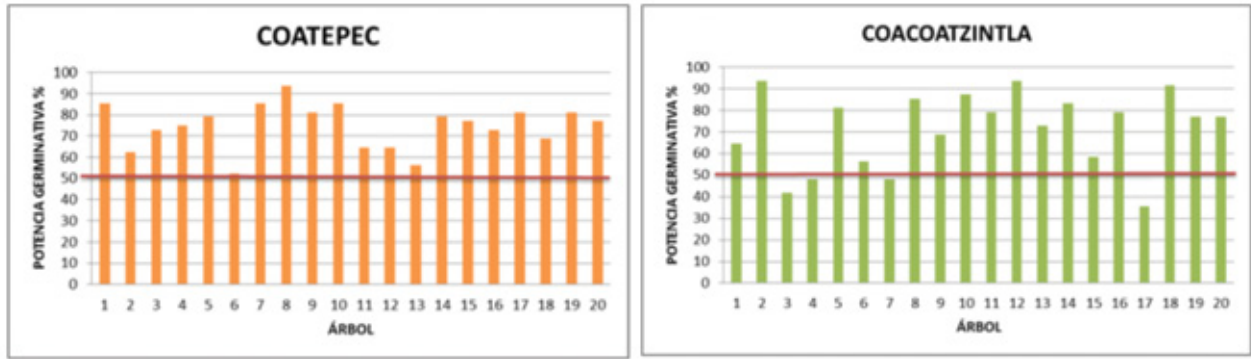


Figura 3. Potencia Germinativa por árbol y población de *Juglans pyriformis* Liebm.
 Figure 3. Germinative Potency per *Juglans pyriformis* Liebm. tree and per population.

Cuadro 3. Clasificación de la semilla según Vigor Germinativo (VG) y número de árbol correspondiente a cada población, Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC).

Población	Calidad	VG	Árbol
CT	Alta	0.341 - 0.606	1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 17, 19 y 20
	Media	0.187 - 0.327	2, 3, 6, 11, 12, 13, 16 y 18
CC	Alta	0.343 - 0.679	2, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19 y 20
	Media	0.174 - 0.286	1, 7, 9, 15
	Baja	0.053 - 0.139	3, 4, 6, 17

Table 3. Seed classification by Germinative Vigor (GV) and tree number for each population: *Coatepec* (CT) and *Coacoatzintla* (CC).

Population	Quality	GV	Tree
CT	High	0.341 - 0.606	1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 17, 19 y 20
	Medium	0.187 - 0.327	2, 3, 6, 11, 12, 13, 16 y 18
CC	High	0.343 - 0.679	2, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19 y 20
	Medium	0.174 - 0.286	1, 7, 9, 15
	Low	0.053 - 0.139	3, 4, 6, 17

La mayoría de las semillas procedentes de Coatepec tuvieron valores altos en cuanto a la potencia germinativa (PG %), germinación diaria media (GDM) y Vigor germinativo (VG); por lo que tienen una calidad más alta que las de Coacoatzintla. El coeficiente de variación (CV) para PG % y VG es bajo, lo que indica que existe poca variación en la germinación de ambas poblaciones (Cuadro 4).

According to the established seed quality intervals (Table 3), twelve individuals with a high quality seed and eight with a medium quality seed were identified in the population of *Coatepec*, while in the population of *Coacoatzintla* twelve trees had a high quality seed, four had a medium quality seed, and another four, a low quality seed.



Cuadro 4. Promedios ± desviación estándar de las variables de germinación de *Juglans pyriformis* Liebm. de las poblaciones de Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC).

Población	Potencia germinativa	Coefficiente de Variación	Germinación diaria media	Vigor germinativo ±Error Estándar	Coefficiente de Variación
CT	74.79 ± 2.31	3.09	0.56	5.77 ± 0.03	7.42
CC	71.15 ± 3.88	5.46	0.53	4.87 ± 0.04	11.30

Table 4. Means ± standard deviations of the germination variables of *Juglans pyriformis* Liebm. in the populations of Coatepec (CT) and Coacoatzintla (CC).

Population	Germinative potency	Variation coefficient	Mean daily germination	Germinative vigor ±Standard error	Variation coefficient
CT	74.79 ± 2.31	3.09	0.56	5.77 ± 0.03	7.42
CC	71.15 ± 3.88	5.46	0.53	4.87 ± 0.04	11.30

El porcentaje de germinación de *J. pyriformis* es mayor a los citados para *Juglans neotropica* (35 %) (López y Piedrahita, 1998); pero menores a los registrados por el CATIE (1999) en semillas frescas de *J. neotropica* (80-90 %); 100 % consignado por Quintero-García y Jaramillo-Villegas (2012) y 80 % por Gómez, (2002 citado en Quintero-García y Jaramillo-Villegas, 2012) para la misma especie. También resultó menor reportado para *J. regia* bajo condiciones de producción en vivero (80 %) y con tratamientos pregerminativos (85-95 %) (Vahdati y Hoseini, 2005). Falta de traducir.

La comparación que se hace del porcentaje de germinación debe tomarse con reserva, ya que en muchos de los trabajos a los que se hace referencia, los valores fueron obtenidos después de que el material biológico se sometió a tratamientos pregerminativos. Cabe mencionar que la semilla de *J. pyriformis* (Figura 4) es catalogada como subortodoxa; es decir, sus periodos de almacenamiento deben ser cortos, por el alto contenido en lípidos (Rojas, 1995); no obstante los porcentajes para ambas poblaciones en el presente trabajo son altos, sin que se les aplicara tratamiento alguno, esto se atribuye a que la semilla fue sembrada inmediatamente después de su beneficiado, y su vigor germinativo no había disminuido por el paso del tiempo.

Calidad de planta

Las plántulas obtenidas de semilla germinada procedente de Coatepec tuvieron >0.500 de ID (Índice de Dickson), por lo que se catalogaron de alta calidad. En este grupo destaca el árbol 9 con un índice de 2.081. Las plántulas de semilla procedente de Coacoatzintla lograron calidad alta y media, sobresalen cinco árboles por presentar calidad de

Most seeds from Coatepec had high values for germinative potency (GP %), mean daily germination (MDG) and germinative vigor (GV); therefore, their quality is higher than that of seeds from Coacoatzintla. The variation coefficient for GP % and GV is low, a sign that there is little variation in germination in both populations (Table 4).

The germination percentage of *J. pyriformis* is higher than that cited for *Juglans neotropica* (35 %) (López and Piedrahita, 1998), but lower for those registered by CATIE (1999) in fresh seeds of *J. neotropica* (80-90 %): 100 % was registered by Quintero-García and Jaramillo-Villegas (2012), and 80 %, by Gómez, (2002 quoted in Quintero-García and Jaramillo-Villegas, 2012) for the same species. It also came lower than the value reported for *J. regia* under nursery production conditions (80%) and with pregerminative treatments (85-95 %) (Vahdati and Hoseini, 2005).

The comparison between germination percentages must be taken with reservations, given that, in many of the referred works, values were obtained after the biological material was subjected to pregerminative treatments. It is noteworthy that *J. pyriformis* seeds (Figure 4) are cataloged as sub-orthodox, i.e., their storage periods must be short due to their high content of lipids (Rojas, 1995). Nevertheless, the percentages for both populations in the present study are high without any treatment; this is attributed to the fact that the seeds were sown immediately after they were collected, and therefore their germinative vigor had not diminished due to the passage of time.

Plant quality

The seedlings obtained from germinated seeds from Coatepec



A) Fruto, B) Pudrición de Fruto, C) Semilla, D) Siembra de semilla en tubete y E) Germinación.
 A) Fruit, B) Rotting of the fruit, C) Seeds, D) Seeds sown in tubes, and E) Germination.

Figura 4. Obtención y establecimiento de semilla de *Juglans pyriformis* Liebm. en vivero.
 Figure 4. Collection and establishment of nursery-grown *Juglans pyriformis* Liebm. seeds.

planta alta, entre ellos el árbol 7, cuyo índice fue de 0.961, que correspondió al más alto para esta población, el resto de los individuos (15) se catalogaron con calidad media (Cuadro 5).

had a Dickson's Index (DI) of >0.500, and were therefore classified as high quality. Tree No. 9 stands out with an index of 2.081. Seedlings from Coacoatzintla seeds attained a high

Cuadro 5. Calidad de planta y árboles de procedencia de la semilla de las poblaciones de Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC).

Población	Calidad	ID	Árbol
CT	Alta	0.592-2.081	Todos
CC	Alta	0.505-0.961	1, 7, 10, 14 y 18
	Media	0.347-0.476	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19 y 20

Table 5. Quality of the seedlings and trees from the seeds of the populations of Coatepec (CT) and Coacoatzintla (CC).

Population	Quality	DI	Tree
CT	High	0.592-2.081	All
CC	High	0.505-0.961	1, 7, 10, 14 y 18
	Medium	0.347-0.476	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19 y 20



La valoración de la planta mediante el índice de Dickson es de gran importancia, ya que pronostica la sobrevivencia y crecimiento en campo de las plantas, al integrar variables morfológicas de altura y diámetro con peso de la planta, mismas que mantienen una interacción altamente significativa, por lo que a valores mayores de índice, la calidad de la planta es mejor (Dickson *et al.* 1960; Olivo y Buduba, 2006; Rodríguez, 2008; Rueda *et al.* 2012).

Los valores de *J. pyriformis* son comparables a los documentados por Rueda *et al.* (2012) para cinco especies de pino (*Pinus devoniana* Lindl., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. greggii* Engelm. ex Parl. y *P. pseudostrabus* Lindl., *Pinus douglasiana* Martínez) y diez de selva (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Roseodendron donell-smithii* (Rose) Miranda, *Tabebuia rosea* (Bertol) DC., *Eucalyptus globulus* Labill., *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg., *Cupressus lusitanica* Mill., *Cedrela odorata*), producidas en ocho viveros forestales de Jalisco, bajo el sistema de tecnificado.

La calidad de planta producida en los viveros de Michoacán es comparable con la obtenida para *J. pyriformis*; por ejemplo, *P. michoacana* presentó ID entre 0.59 y 4.1 y fue calificada como alta; en *P. greggii*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrabus* se tuvo calidad media (ID 0.21 a 0.32); *P. greggii* obtuvo los ID más bajos (0.13), considerada calidad baja (Saenz *et al.*, 2010).

Al comparar la calidad de planta (ID) de las especies antes mencionadas, con los valores de ID determinados para *J. pyriformis*, es posible afirmar que, siempre y cuando sea llevada a condiciones edáficas y climáticas similares a las del lugar de origen, podrá sobrevivir y desarrollarse adecuadamente. Lo anterior evidencia la importancia que tiene, tanto conocer a priori las condiciones del sitio donde será plantada como determinar la calidad de la planta antes de salir del vivero.

Selección de árboles semilleros

A partir de que los árboles semilleros deben tener características sobresalientes y que los porcentajes de germinación y vigor de sus semillas sean altos (Poulsen, 2000); además de, que las plántulas producidas en vivero requieren tener características morfológicas apropiadas al sitio de plantación, para que sobrevivan y tengan buen desarrollo (Rodríguez, 2008), se definieron dos categorías en la selección de los árboles semilleros de *J. pyriformis*, bajo los siguientes criterios:

Categoría I: árboles clase 1, con un vigor germinativo o Índice de Czabator (VG \geq 0.34) equivalente a PG % \geq 75) e Índice de Dickson (ID \geq 0.5) por árbol/población.

Categoría II: árboles clase 1 o clase 2, con un vigor germinativo bajo o medio (<0.169; 0.170-0.340, respectivamente) e índice de Dickson bajo o medio (<0.2; 0.2-0.4, respectivamente).

and a medium quality; five trees stand out for their high plant quality, including tree No. 7, which had an index of 0.961--the highest among this population--, while the rest of the individuals (15) were classified as medium quality (Table 5).

The assessment of the plants using Dickson's index is highly important, as it predicts the in-field survival and growth, by integrating morphological variables of height and diameter with the weight of the plant, all of which maintain a highly significant interaction; thus, the higher the index, the better the plant (Dickson *et al.* 1960; Olivo and Buduba, 2006; Rodríguez, 2008; Rueda *et al.* 2012).

The records for *J. pyriformis* are comparable to those documented by Rueda *et al.* (2012) for five pine species (*Pinus devoniana* Lindl., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. greggii* Engelm. ex Parl. and *P. pseudostrabus* Lindl., *Pinus douglasiana* Martínez) and 10 rainforest species (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Roseodendron donell-smithii* (Rose) Miranda, *Tabebuia rosea* (Bertol) DC., *Eucalyptus globulus* Labill., *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg., *Cupressus lusitanica* Mill., *Cedrela odorata*), produced in eight forest nurseries in Jalisco under a technified production system.

The quality of the nursery-grown plants of Michoacán is comparable to that obtained for *J. pyriformis*. For example, *P. michoacana* had a DI between 0.59 and 4.1 and was rated as high; in *P. greggii*, *P. oocarpa* and *P. pseudostrabus*, a medium quality was obtained (ID 0.21 to 0.32), while *P. greggii* had the lowest DI (0.13), rated as low quality (Saenz *et al.*, 2010).

After comparing the plant quality (DI) of the species mentioned above with the DI values determined for *J. pyriformis*, it may be said that, as long as it is grown in similar edaphic and climatic conditions to those of its place of origin, it will be able to survive and develop properly; this shows the importance of having a priori knowledge of the conditions into which it will be planted and of determining the quality of the plant before it leaves the nursery.

Seed tree selection

Based on the facts that seed trees must have outstanding characteristics, that the germination percentages and vigor of their seeds must be high (Poulsen, 2000), and that the seedlings produced in the nursery must have morphological characteristics suitable for the plantation site in order to survive and develop properly (Rodríguez, 2008), two categories were defined in the selection of *J. pyriformis* seed trees, under the following criteria:

Cuadro 6. Árboles semilleros de *Juglans pyriformis* Liebm. categoría I y II para las poblaciones de Coatepec (CT) y Coacoatzintla (CC).

Coatepec																				
Categoría I										Categoría II										
Clase	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VG	0.57	0.45	0.45	0.43	0.40	0.40	0.38	0.35	0.34	0.25	0.24	0.19	0.17	0.61	0.57	0.38	0.33	0.32	0.27	0.27
ID	1.31	1.18	0.84	1.17	1.49	1.46	0.80	1.28	1.26	1.50	1.16	1.13	1.35	208	0.88	0.92	1.19	0.89	1.05	0.59
Núm. árbol	7	10	1	14	15	17	5	20	4	12	2	13	6	9	8	19	16	3	18	11

Coacoatzintla																				
Categoría I										Categoría II										
Clase	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
VG	0.56	0.52	0.68	0.57	0.54	0.47	0.29	0.28	0.10	0.60	0.42	0.38	0.37	0.37	0.34	0.21	0.18	0.17	0.13	0.07
ID	0.60	0.52	0.37	0.45	0.35	0.47	0.87	0.43	0.42	0.51	0.42	0.37	0.37	0.47	0.42	0.37	0.44	0.96	0.45	0.48
Núm. árbol	14	10	12	8	2	19	1	9	3	18	5	11	13	16	20	15	6	7	4	17

Para las poblaciones de Coatepec, de las columnas 1 a la 9 pertenecen a la Categoría I y de la columna 10 a la 20 a la Categoría II. Para las de Coacoatzintla, únicamente las columnas 1 y 2 se clasifican en la Categoría I y las demás en la Categoría II.

Table 6. Category I and II *Juglans pyriformis* Liebm. seed trees within the populations Coatepec (CT) and Coacoatzintla (CC).

Coatepec																				
Category I										Category II										
Class	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GV	0.57	0.45	0.45	0.43	0.40	0.40	0.38	0.35	0.34	0.25	0.24	0.19	0.17	0.61	0.57	0.38	0.33	0.32	0.27	0.27
DI	1.31	1.18	0.84	1.17	1.49	1.46	0.80	1.28	1.26	1.50	1.16	1.13	1.35	208	0.88	0.92	1.19	0.89	1.05	0.59
No. of trees	7	10	1	14	15	17	5	20	4	12	2	13	6	9	8	19	16	3	18	11

Coacoatzintla																				
Category I										Category II										
Class	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
GV	0.56	0.52	0.68	0.57	0.54	0.47	0.29	0.28	0.10	0.60	0.42	0.38	0.37	0.37	0.34	0.21	0.18	0.17	0.13	0.07
DI	0.60	0.52	0.37	0.45	0.35	0.47	0.87	0.43	0.42	0.51	0.42	0.37	0.37	0.47	0.42	0.37	0.44	0.96	0.45	0.48
No. of trees	14	10	12	8	2	19	1	9	3	18	5	11	13	16	20	15	6	7	4	17

For the populations of Coatepec, columns 1 to 9 belong to Category I and from 10 to 20 to Category II. For those of Coacoatzintla, only columns 1 and 2 are classified into Category I and the rest into Category II.

Con base en estos criterios se identificaron nueve árboles semilleros potenciales en la población de Coatepec y dos en Coacoatzintla, agrupados en la Categoría I, el resto pertenecen a la Categoría II (Cuadro 6).

Category I: Class 1 trees, with a germinative vigor or Czabator's Index ($GV \geq 0.341$) equivalent to GP % ≥ 75 and a Dickson's Index (DI) equal to or above 0.5 per tree/population.

De acuerdo con los criterios de Samaniego (2002), los individuos de *J. pyriformis* Clase 1 son fenotípicamente sobresalientes, por lo que pueden ser considerados árboles semilleros. Sanjuanbenito y Ramírez (2007) mencionan que la semilla colectada a partir de árboles sobresalientes puede destinarse al establecimiento de plantaciones comerciales, mejoramiento genético y programas de conservación y reforestación. Los árboles Clase 2, cuentan con algunas características fenotípicas sobresalientes, pero presentan bifurcación superior y la dominancia del eje principal es parcial (Samaniego, 2002; Sanjuanbenito y Ramírez, 2007); su semilla se utilizaría en programas de conservación y protección.

Las poblaciones de *Juglans pyriformis* localizadas en Coatepec y Coacoatzintla tienen características suficientes para ser fuentes semilleras: son accesibles, los árboles presentan buen estado fitosanitario y cuentan con suficientes individuos maduros para la colecta de semilla. El germoplasma procedente de los árboles clasificados en dentro de la Categoría I se pueden usar en la producción de planta para el establecimiento de plantaciones comerciales, mejoramiento genético y programas de conservación y reforestación. La semilla de los árboles pertenecientes a la Categoría II, se emplearían para obtener planta dirigida a programas de conservación y protección, tanto de ecosistemas como de suelos.

Para su manejo, es importante implementar un programa de conservación, en el cual *Juglans pyriformis* sea considerada no sólo desde la perspectiva económica, sino también desde la ecológica, como un componente de la estructura y funcionalidad del bosque mesófilo de montaña. Dicho programa debe atender las condiciones locales y integrar la participación coordinada de los sectores involucrados e interesados, a fin de ser sustentable y garantizar la permanencia de la especie.

Conclusiones

En la población de Coatepec se identifican un número mayor de árboles con características fenotípicas sobresalientes para ser seleccionados como árboles semilleros. De igual forma, la calidad de semilla tiene un potencial germinativo más alto, y la plántula presenta calidad alta. 🌱

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó con financiamiento PROMEP/103.5/12/ 4543 con cargo al Proyecto de Apoyo a la Reincorporación de Exbecarios "Bases para la conservación *in situ* de *Juglans pyriformis*: una especie en peligro de extinción". A dueños de predios de Coatepec y Coacoatzintla que dieron permiso para la colecta de semilla de *Juglans pyriformis*.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Category II: Class 1 or Class 2 trees, with a low or medium germinative value (<0.169; 0.170-0.340, respectively) and a low or medium Dickson's Index (<0.2; 0.2-0.4, respectively).

Based on these criteria, nine potential seed trees in the population of Coatepec and two in Coacoatzintla were identified as belonging to Category I; the rest pertain to Category II (Table 6).

According to the criteria of Samaniego (2002), Class 1 *J. pyriformis* individuals are phenotypically outstanding and therefore may be regarded as seed trees. Sanjuanbenito and Ramírez (2007) mention that the seed collected from the outstanding trees can be destined to the establishment of commercial plantations, genetic enhancement and conservation and reforestation programs. Class 2 trees have certain outstanding phenotypic characteristics, but they exhibit high forking and a partial dominance of the main axis (Samaniego, 2002; Sanjuanbenito and Ramírez, 2007); their seeds can be utilized in conservation and protection programs.

Populations localized in Coatepec and Coacoatzintla have sufficient characteristics that make them sources of seeds: they are accessible, and the trees they contain have a good phytosanitary status and include sufficient mature individuals for seed collection. The germoplasm from trees classified within Category I can be used to produce seedlings for the establishment of commercial plantations, genetic enhancement and conservation and reforestation programs. The seeds of Category II trees can be used to grow seedlings for programs for the conservation and protection of soils and ecosystems.

In order to manage them, it is important to implement a conservation program in which *Juglans pyriformis* may be considered as a component of the structure and functionality of the Montane Cloud Forest, not only from an economic perspective but also from the ecologic point of view. Such a program must address the local conditions and integrate the coordinated participation of the involved sectors so as to be sustainable and ensure the permanence of the species.

Conclusions

A larger number of trees with outstanding phenotypic characteristics for selection as seed trees were identified in the population of Coatepec. Likewise, the seed quality in this population has a higher germinative potential, and the seedlings are of a high quality. 🌱

Acknowledgements

The present work was made possible thanks to the PROMEP/103.5/12/ 4543 funding provided by the Support for the *Proyecto de Apoyo para la Reincorporación de Exbecarios, "Bases para la conservación in situ* de

Contribución por autor

Enice Ortiz Muñoz: trabajo en campo, análisis de datos y redacción del manuscrito; Celia Cecilia Acosta Hernández: participación en las fases de campo, análisis de datos, dirección del proyecto, gestión de los recursos financieros, redacción del documento; Pascual Linares Márquez: redacción y revisión del manuscrito; Zoylo Romero Morales: análisis estadístico de los datos; Virginia Rebolledo Camacho: asesoría en el análisis de datos y redacción del manuscrito.

Referencias

- Acosta-Hernández, C. C., M. Luna-Rodríguez, J. C. Noa-Carrazana, J. Galindo-González, S. M. Vázquez-Torres, Z. Morales-Romero y L. G. Iglesias-Andreu. 2011a. Caracterización morfológica y dasométrica de la especie amenazada *Juglans pyriformis* Liebm. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 17(1):59-67.
- Acosta-Hernández, C. C., M. Luna-Rodríguez, P. Octavio-Aguilar, Z. Morales-Romero, J. Galindo-González, J. C. Noa-Carrazana, S. M. Vázquez-Torres y L. G. Iglesias-Andreu L. 2011b. Efecto del aprovechamiento forestal sobre la variación morfológica de *Juglans pyriformis* Liebm. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 17(3):379-388.
- Aletà, N., A. Ninot y J. Voltas. 2003. Caracterización de doce genotipos de *Juglans* spp en dos localidades de Cataluña. Investigación Agraria: Sistemas Agroforestales 12(1): 29-50.
- Aletà, N., A. Vilanova, R. Díaz y J. Voltas. 2009. Comportamiento de 24 progenies de nogal común (*Juglans regia* L.) para su uso en la producción de madera. Resultados hasta sexto año de crecimiento. V Congreso Forestal Español. 21-25 de septiembre de 2009. Ávila, España. 12 p.
- Carrillo S., A. y J. Ávila G. 1979. Colecta y rendimiento de semillas de coníferas-Estimación en función de peso de conos. Ciencia Forestal 20(4): 13-31.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 1999. *Juglans neotropica* Diels. Centro agronómico de Costa Rica. Nota técnica sobre semillas forestales Núm.82. Turrialba, Costa Rica. pp. 1-2.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2008. Expedientes de los proyectos autorizados por el PRODEPLAN 1997-2008. Gerencia Nacional de Plantaciones. PRODEPLAN. Comisión Nacional Forestal. Jalapa, Ver., México. s/p.
- Dickson, A., A. L. Leaf and J. F. Hosner. 1960. Quality appraisal of White spruce and White pine seedling stock in nurseries. The Forestry Chronicle 36(1): 10-13.
- Jardel P., E. 2006. Viejos y nuevos problemas en el sector forestal en México. Instituto Manantlan de Ecología y Conservación de la Biodiversidad. Centro Universitario de la Costa Sur. Universidad de Guanajuato. Autlán de Navarro, Jal., México. 12 p.
- López, J. y E. Piedrahita. 1998. Tratamientos pregerminativos aplicados a la semilla de Cedro negro (*Juglans neotropica*) para reducir su periodo de germinación. In: Salazar, R. (coord.). 1999. II Simposio sobre avances en la producción de semillas forestales en América Latina. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. pp. 191-200.
- Luna V., I., O. Alcántara A., R. Contreras-Medina and A. Ponce V. 2006. Biogeography, current knowledge and conservation of threatened vascular plants characteristic of Mexican temperate forests. Biodiversity and Conservation 15(12): 3773-3799.
- Narave, F. H. 1983. La familia Juglandaceae en Veracruz. Flora de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz. 30 p.
- Olivo, V. B. y C. G. Buduba. 2006. Influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. Bosque 27(3): 267-271.

Juglans pyriformis: una especie en peligro de extinción"), "Bases for the *in situ* preservation of *Juglans pyriformis*, an endangered species" Project for the Reincorporation of Former Grantees). The authors wish to express, too, our gratitude to those plot owners in Coatepec and Coacoatzintla who gave us permission to collect *Juglans pyriformis* seeds.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Enice Ortiz Muñoz: field work, data analysis and writing of the paper; Celia Cecilia Acosta Hernández: support in field work, data analysis, leadership of the project, negotiation of financial resources, writing of the manuscript; Pascual Linares Márquez: writing and review of the manuscript; Zoylo Romero Morales: statistical analysis of the data; Virginia Rebolledo Camacho: advice on data analysis and writing of the manuscript.

End of the English version



- Piedrahita C., E. 1998. Aumento del vigor en semillas de *Pinus patula* (Schlecht. y Cham.) por el efecto de osmocondicionamiento. Crónica forestal y del Medio Ambiente 13(1):1-20.
- Poulsen, K. M. 2000. Calidad de la semilla: concepto, medición y métodos para incrementar la calidad. In: Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (coord.). Técnicas para la germinación de semillas forestales. Proyecto de semillas Forestales. CATIE. Serie Técnica. Manual Técnico Núm. 39. Turrialba, Costa Rica. pp. 1-15.
- Quintero-García, O. D. y S. Jaramillo-Villegas. 2012. Rescate y germinación *in vitro* de embriones inmaduros de cedro negro (*Juglans neotropica* Diels). Acta Agronómica 61(1): 52-60.
- Rodríguez T., D. A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Mundi Prensa. México, D.F., México. 156 p.
- Rojas R., F. 1995. Almacenamiento y manejo del contenido de humedad en semillas forestales tropicales: principios y procedimientos. In: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (ed.). Curso regional sobre recolecta y procesamiento de semillas forestales. CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp. 57-66.
- Rueda S., A., J. D. Benavides S., J. A. Prieto-Ruiz, J. T. Sáenz-Reyes, G. Orozco-Gutiérrez y A. Molina C. 2012. Calidad de planta producida en los viveros forestales de Jalisco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3(14): 69-82.
- Sáenz R., J. T., F. J. Villaseñor R., H. J. Muñoz F., A. Rueda S. y J. A. Prieto R. 2010. Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Técnico Núm. 17. Sagarpa-Inifap-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Mich., México. 48 p.
- Salazar, R. y D. Boshier. 1989. Establecimiento y manejo de rodales semilleros de especies forestales prioritarias en América Central. Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELEÑA). Madeleña/Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Serie técnica Núm.148. Turrialba, Costa Rica. 80 p.
- Samaniego, R. C. 2002. Las fuentes semilleras y semillas forestales nativas en el austro ecuatoriano: participación social en el manejo. Fundación Ecológica Condesur. Loja, Ecuador. 14 p.
- Sanjuanbenito, G. P. y M. D. Ramírez-Cárdenas. 2007. Fuentes semilleras de la comunidad de Madrid. Serie técnica de medio natural Núm. 2. Madrid, España. 194 p.

Servicio Meteorológico Nacional. Normales Climatológicas 2014a. Estado de Veracruz. Estación Meteorológica Coatepec, Veracruz periodo 1981-2010. Conagua. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14&Itemid=2 (14 de febrero de 2014).

Servicio Meteorológico Nacional. Estación Meteorológica. 2014b. Estado de Veracruz. Estación Meteorológica Naalincó de Victoria, Veracruz periodo 1981-2010. Conagua. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14&Itemid=2 (14 de febrero de 2014).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT. Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categoría de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. 30 de diciembre de 2010. Segunda edición. México, D.F., México. 78 p.

Vahdati, K. and S. H. Hoseini. 2005. Introducing an innovative procedure for large commercial seed lots stratification in persian walnut. Acta Horticulturae 705: 355-357.





Artículo / Article

Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino

Variation of carbon distribution between the root and the aerial part in three pine species

Jesús Morales Hernández¹, Mariela Gómez Romero², Crisanto Velázquez Becerra¹
y Enrique Ambriz Parra¹

Resumen

La cantidad de carbono destinada para la parte aérea y la raíz varía entre las especies de plantas y su balance es determinante para la supervivencia de las plantas en campo. El objetivo del presente estudio fue evaluar la distribución de carbono a través de variables de crecimiento y morfología de la raíz en ejemplares de *Pinus michoacana*, *P. martinezii* y *P. pseudostrobus*. El crecimiento se evaluó en vivero y las plántulas fueron regadas cada tercer día con agua corriente. A los 150 días se evaluó la biomasa de la parte aérea y de la raíz, la longitud específica de la raíz (LER) y el volumen de la raíz (VR), así como el número, el diámetro (DPRL) y la longitud (LPRL) de las raíces laterales. La biomasa de la parte aérea y de la raíz, el VR y la LER fueron similares entre *P. pseudostrobus* y *P. martinezii*, mientras que *P. michoacana* presentó valores significativamente mayores en dichos parámetros en relación a las otra dos especies. El número total, la LPRL y el DPRL fueron más altos en *P. michoacana* en comparación con *P. pseudostrobus* y *P. martinezii*; estas variables fueron superiores en *P. pseudostrobus* con respecto a *P. martinezii*. La distribución de carbono varió entre especies y fue más evidente en las variables de morfología de raíz. Por lo tanto, se concluye incluir parámetros de morfología de raíz como indicadores de calidad de planta.

Palabras clave: Biomasa de raíz, longitud específica de raíz, morfología de raíz, *Pinus michoacana* Martínez, *Pinus martinezii* E. Larsen, *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Abstract

The amount of carbon allocated to the shoot and root varies between species. The carbon balance of the shoot and the root is critical for survival in the field. Therefore, the objective of this study was to evaluate carbon allocation through variables of growth and root morphology in *Pinus michoacan*, *P. pseudostrobus* and *P. martinezii* plants, which have variation in survival in the field. The plants were growth in nursery and watered twice a week with tap water. At 150 days, the shoot and root biomass, specific root length (SRL) and root volume (RV), and the number, diameter (RD) and length (RL) of lateral roots were evaluated. The shoot and root biomass, RV and the LER were similar between *P. pseudostrobus* and *P. martinezii*, while *P. michoacana* had significantly higher values of these parameters in relation to the other two species. The number, RL and RD were higher in *P. michoacana* as compared to *P. pseudostrobus* and *P. martinezii* and these variables were higher in *P. pseudostrobus* regarding to *P. martinezii*. The carbon allocation varied inter-species and it was higher in the variables of root morphology. Therefore, it is recommended that root morphology parameters could be taken into account as indicators of quality plant.

Key words: Root biomass, specific root length, root morphology, *Pinus michoacana* Martínez, *Pinus martinezii* E. Larsen, *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Fecha de recepción/Reception date: 8 de febrero de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 29 de octubre de 2016.

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. Correo-e: enriqueambriz1@gmail.com

² Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Introducción

La distribución de carbono se refiere al carbono destinado a la producción de diferentes partes de la planta (Friend *et al.*, 1994); se han propuesto dos teorías: la óptima (Bloom *et al.*, 1985), que establece que una planta lo dirige hacia el órgano que adquiere la fuente más limitante, y la de biomasa alométrica (Niklas y Enquist, 2001) que lo refiere a la sección aérea o a la raíz, en función de su tamaño, calculado por peso seco o por longitud. La cantidad de carbono que se dedica a cada una de estas dos estructuras depende de las condiciones de crecimiento e historia de vida, y es importante porque influye en la capacidad de supervivencia de los pinos después de la plantación (South, 2000). Por lo tanto, es conveniente conocer esta información en especies utilizadas en reforestación y en conservación.

En relación a las condiciones de crecimiento, una disminución en la masa de la parte aérea y de la masa radical en *Pinus pinaster* Ait., *P. pinea* L., *P. canariensis* C. Sm. ex DC., *P. halepensis* Mill. se presentó en situaciones de poca disponibilidad de agua en la cámara de crecimiento (Chambel *et al.*, 2007) y en invernadero (Aranda *et al.*, 2010); en este último ambiente se ha observado el mismo comportamiento en latifoliadas cultivadas (Guarnaschelli *et al.*, 2003).

Por otra parte, las plantas confieren una cantidad de carbono mayor para la construcción de raíces laterales en sitios infértiles (Paz, 2003) o húmedos (Markesteyn y Poorter, 2009), así como para construir una raíz profunda si las semillas proceden de sitios con baja disponibilidad de agua y se desarrollan en invernadero con suficiente agua y nutrientes (Climent *et al.*, 2008).

Así, la distribución de carbono está sujeta a factores como la procedencia o el ámbito de crecimiento y es factible evaluarla de forma indirecta mediante variables asociadas al mismo, lo que facilita la identificación de especies con mejor respuesta en condiciones naturales. Por lo tanto, en la hipótesis de este trabajo se planteó que existe variación significativa en la distribución de carbono en especies con diferente supervivencia en campo: *Pinus michoacana* Martínez con 76 % (Gómez-Romero *et al.*, 2012); *P. pseudostrobus* Lindl. de 2 y 68 % (Muñoz *et al.*, 2011; Gómez-Romero *et al.*, 2012) y *P. martinezii* E. Larsen, por su valor de conservación.

Materiales y Métodos

Las variables que se consideraron fueron peso seco y fresco de la parte aérea y de la raíz, longitud específica de la raíz y su morfología en plántulas de las especies seleccionadas cultivadas en vivero.

Se recolectaron 6 960 semillas de *Pinus martinezii* en Los Azufres, Municipio Ciudad Hidalgo, Michoacán, México

Introduction

Carbon distribution refers to the carbon allocated to the production of different parts of the plant (Friend *et al.*, 1994); two theories have been proposed: the optimal (Bloom *et al.*, 1985), which states that a plant directs it to the organ that acquires the most limiting source, and that of allometric biomass (Niklas and Enquist, 2001) which sends it to the aerial section or the root, depending on its size, calculated by dry weight or length. The amount of carbon devoted to each of these two structures depends on growth conditions and life history, and is important because it influences the survival capacity of pines after planting (South, 2000). Therefore, it is convenient to know this information in species used in reforestation and conservation.

In relation to growth conditions, a decrease in shoot mass and root mass in *Pinus pinaster* Ait., *P. pinea* L., *P. canariensis* C. Sm. ex DC., *P. halepensis* Mill. occurred in growth chamber where situations of low availability of water prevailed (Chambel *et al.*, 2007) and in greenhouse (Aranda *et al.*, 2010); in the latter environment the same behavior has been observed in cultivated hardwoods (Guarnaschelli *et al.*, 2003).

On the other hand, plants confer a larger amount of carbon to build lateral roots in infertile (Paz, 2003) or humid places (Markesteyn and Poorter, 2009), as well as to make up a deep root if the seeds come from sites with low water availability and develop in greenhouses with sufficient water and nutrients (Climent *et al.*, 2008).

Thus, the carbon distribution is subject to factors such as the provenance or scope of growth and it is feasible to evaluate it indirectly through variables associated with it, which facilitates the identification of species with better response under natural conditions. Therefore, in the hypothesis of this work it was considered that there is significant variation in the carbon distribution in species with different survival in the field: *Pinus michoacana* Martínez with 76 % (Gómez-Romero *et al.*, 2012); *P. pseudostrobus* Lindl. from 2 to 68 % (Muñoz *et al.*, 2011; Gómez-Romero *et al.*, 2012) and *P. martinezii* E. Larsen, for their conservation value.

Materials and Methods

The variables that were considered were the fresh and dry weight of the shoot and root, specific length of the root and their morphology in seedlings of the selected species that were grown at the nursery.



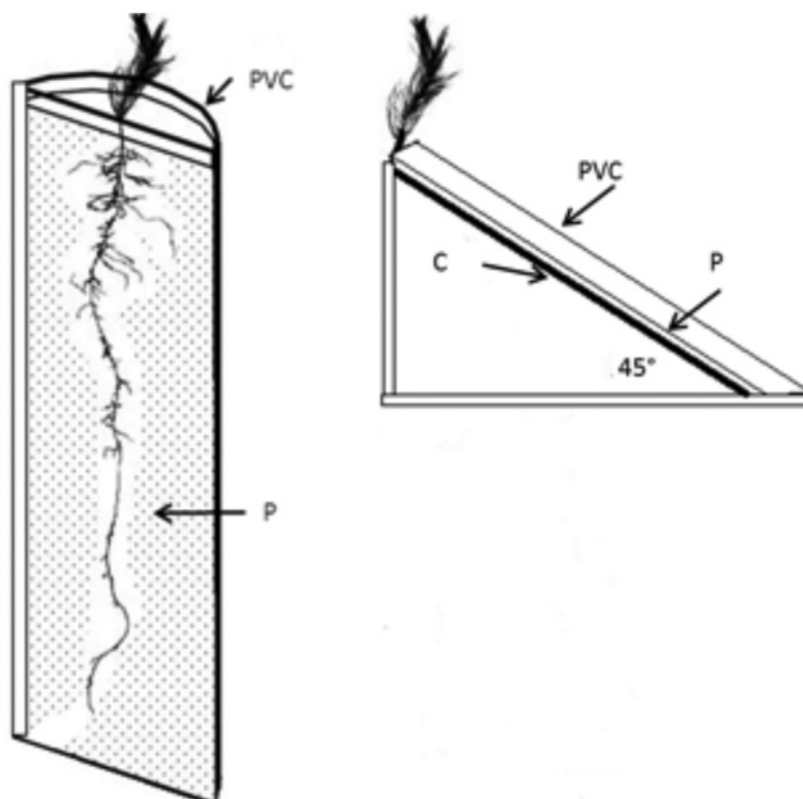
(Morales, 2014) equivalentes a 100 g y lo mismo de semillas de *P. michoacana* Martínez y de *P. pseudostrobus* Lindl., que fueron proporcionadas por la Comisión Forestal del Estado de Michoacán.

De este material, se tomaron cien semillas por especie para este estudio. Se les aplicó un tratamiento pregerminativo de estratificación, que consiste en someterlas a una temperatura de 4 °C durante 15 días. Las semillas ya pre-tratadas se sembraron en cavidades de unicel en sustrato turba-agrolita en una proporción de 1:2 (volumen:volumen), para luego colocarlas en una cámara de crecimiento-germinación bajo condiciones de 25 °C, 75 % de HR y 14 horas de fotoperiodo.

De las plántulas obtenidas (con un porcentaje de germinación entre 85 y 95 %), se seleccionaron 20 de 6 cm de altura por especie, que se les trasplantó en un sistema de mini-rizotrones (Climent et al., 2008). Estos mini-rizotrones se formaron a partir de tubos de polivinilo de cloruro (PVC) de 10 cm de diámetro y 35 cm de longitud, los cuales fueron cortados por el centro, de lo que resultaron dos mini-rizotrones de cada tubo (Figura 1).

A total of 6 960 *Pinus martinezii* seeds were collected in Los Azufres, Ciudad Hidalgo municipality, Michoacán State, México (Morales, 2014) equivalent to 100 g and the same volume for *P. michoacana* Martínez and *P. pseudostrobus* Lindl. seeds, which were provided by the Comisión Forestal del Estado de Michoacán (Forest Commission of the State of Michoacán).

From this material, one hundred seeds per species were taken for this study. A pregerminative treatment of stratification was applied, which consists of subjecting them to a temperature of 4 °C for 15 days. The pre-treated seeds were seeded in unicell cavities in peat-agrolite substrate in a ratio of 1: 2 (volume: volume), then placed in a germination-growing chamber under conditions of 25 °C, 75 % of RH and 14 hours of photoperiod.



P = Policarbonato celular transparente; PVC = Polivinilo de cloruro; C = Lámina de contrachapado de madera de 3 mm de espesor.

P = Clear cell polycarbonate; PVC = Polyvinyl chloride; C = Plywood plywood 3 mm thick.

Figure 1. Mini-rizotron for the growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus martinezii* E. Larsen and *Pinus michoacana* Martínez plants.

Figura 1. Mini-rizotron para el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus martinezii* E. Larsen y *Pinus michoacana* Martínez.

A los 150 días del trasplante, se practicó un análisis destructivo con 10 plantas por especie seleccionadas al azar. De cada una se registró el peso fresco y el peso seco de la parte aérea y de la raíz obtenidos mediante balanza analítica (Ohaus modelo PA214).

De la segunda se determinaron, también, la longitud específica de raíz (LER) (relación entre la longitud de raíz y peso seco de la raíz en cm g^{-1}), la densidad (relación entre peso seco de raíz y el volumen fresco en g cm^{-3} y volumen fresco de raíz (método de desplazamiento de agua en una pipeta graduada de 1 ml). Se evaluaron todas las raíces laterales para efectos del número, longitud (cm) y diámetro (mm). Su clasificación se basó en la raíz principal como referente, a partir de la cual las raíces más cercanas, serían las de primer orden. La longitud total (LTRL) se calculó mediante la sumatoria de todas ellas.

Después de las mediciones en fresco, las plántulas se secaron en un horno (Terlabo modelo TE-H35D) a 60°C por siete días hasta llegar a peso constante (g) en cada sección.

El análisis del sistema radical se llevó a cabo mediante el programa ImageJ 1.4 (Macintosh). Se utilizó un ANOVA mediante un diseño completamente al azar con el paquete S-pluss (Tibco Software Inc., 2000) con un valor de $P < 0,05$ para la significancia.

Resultados y Discusión

Los resultados indican que *Pinus michoacana* alcanzó valores significativamente mayores en peso fresco y seco de las partes estudiadas respecto a *P. martinezii* y *P. pseudostrobus*. El crecimiento de primera especie fue de entre 72 y 97 % en la parte aérea y de 70 y 140 % en la raíz. Entre *P. martinezii* y *P. pseudostrobus* no se presentó diferencia significativa en dichas variables (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores promedio en biomasa aérea y biomasa de raíz.

	Biomasa aérea		Biomasa de raíz		A/R
	PF (g)	PS (g)	PF (g)	PS (g)	
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	0.69 ± 0.479 b	0.18 ± 0.012 b	0.46 ± 0.037 b	0.0 ± 0.005 b	1.96 ± 0.155 a
<i>Pinus martinezii</i> E. Larsen	0.78 ± 0.107 b	0.18 ± 0.023 b	0.60 ± 0.080 b	0.10 ± 0.012 b	1.91 ± 0.158 a
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	1.36 ± 0.114 a	0.34 ± 0.027 a	1.02 ± 0.078 a	0.22 ± 0.015 a	1.58 ± 0.085 a

PF = Peso fresco; PS = Peso seco; A/R = Proporción parte aérea y raíz; ± = Error estándar. Letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$ y $n = 10$ por especie).

From the seedlings obtained (with a percentage of germination between 85 and 95 %), 20 of 6 cm high were selected per species, which were transplanted to a mini-rhizotron system (Climent *et al.*, 2008). These mini-rhizotrons were formed from polyvinyl chloride (PVC) tubes 10 cm in diameter and 35 cm in length, which were cut by the center, resulting in two mini-rhizotrons from each tube (Figure 1).

150 days after transplantation, a destructive analysis was performed with 10 plants per species selected at random. From each of the structures studied, the fresh weight and dry weight were recorded by analytical balance (Ohaus I PA214 mode).

From the root, the specific length (LER) (ratio between root length and root dry weight in cm g^{-1}), density (root dry weight ratio and fresh volume in g cm^{-3} and the fresh volume (water displacement method in 1 ml graduated pipette), all lateral roots were evaluated for number, length (cm) and diameter (mm) effects, and their classification was based on the main root as The total length (LTRL) was calculated by summing all of them.

After the fresh weight measurements, the seedlings were dried in an oven (Terlabo TE-H35D model) at 60°C for seven days until reaching constant weight (g) in each section.

The analysis of the radical system was carried out by the ImageJ 1.4 program (Macintosh). An ANOVA was used by a completely randomized design with the S-pluss package (Tibco Software Inc., 2000) with a P value <0.05 for significance.



Table 1. Average values of aerial biomass and root biomass.

Species	Aerial biomass		Root biomass		
	PF (g)	PS (g)	PF (g)	PS (g)	A/R
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	0.69±0.479 b	0.18±0.012 b	0.46±0.037 b	0.09±0.005 b	1.96±0.155 a
<i>Pinus martinezii</i> E. Larsen	0.78±0.107 b	0.18±0.023 b	0.60±0.080 b	0.10±0.012 b	1.91±0.158 a
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	1.36±0.114 a	0.34±0.027 a	1.02±0.078 a	0.22±0.015 a	1.58±0.085 a

PF = Fresh weight; PS = Dry weight; A/R = Aerial part and root rate; ± = Standard error. Different letters indicate significant statistical difference ($P < 0.05$ and $n = 10$ individuals per species).

El crecimiento de las tres especies no se ha reportado considerando un mismo sistema. Estos resultados sugieren que *P. pseudostrabus* y *P. martinezii* provienen de sitios similares, tal como se ha observado en otras especies de pinos (Salazar et al., 1999) y que la supervivencia de estas dos especies posiblemente es similar.

Además, *P. michoacana* podría tener mayor potencial de supervivencia que *P. pseudostrabus* y *P. martinezii*, dado que presenta mayor capacidad de almacenamiento de agua (peso fresco de parte aérea y raíz) e incorpora como tejidos cantidad de carbono asimilado (peso seco) bajo condiciones similares de crecimiento. Esto coincide con los resultados reportados por Gómez-Romero et al. (2012), quienes observaron mayor supervivencia de plantas de *P. michoacana* respecto a plantas de *P. pseudostrabus* en un sitio degradado.

La proporción parte aérea/raíz (A/R) presentó valores entre 1.58 y 1.96 en las tres especies. Estudios previos mostraron que las especies de coníferas destinan mayor carbono para construir la parte aérea que la raíz (Levy et al., 2004; Mokany et al., 2006), lo cual coincide con los resultados de este experimento. Esta distribución de carbono (proporción A/R) coincide con la teoría de la distribución de biomasa alométrica (Niklas y Enquist, 2001) e indica que las tres especies provienen de sitios similares en relación a la disponibilidad de agua. En este sentido, Cregg (1994) observó mayor distribución de carbono a la parte aérea en las plantas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. de diferentes localidades con alta disponibilidad de agua.

Las variables de la raíz se presentan en el Cuadro 2 y éstas no mostraron diferencia significativa entre *P. martinezii* y *P. pseudostrabus*, mientras que la diferencia entre estas dos especies y *P. michoacana* fue significativa, lo cual es similar a lo observado en peso de raíz y parte aérea. La distribución de carbono medida a través de variables morfológicas de raíz no se ha reportado en condiciones de adecuada disponibilidad de agua. La longitud específica de raíz (LER) varió entre las diferentes especies evaluadas en este experimento y fue mayor al 100 % en las plantas de *P. pseudostrabus* y *P. martinezii* en relación a *P. michoacana*. Dichos resultados coinciden con los reportados por King et al. (1997), quienes observaron diferencia significativa

Results and Discussion

Results indicate that *Pinus michoacana* reached significantly higher values in fresh and dry weight of the studied parts compared to *P. martinezii* and *P. pseudostrabus*. The growth of the first species was 72 to 97 % in the aerial part and 70 to 140 % in the root. There was no significant difference in these variables between *P. martinezii* and *P. pseudostrabus* (Table 1).

The growth of the three species has not been recorded from the same system. These results suggest that *P. pseudostrabus* and *P. martinezii* come from similar sites, as has been observed in other pines (Salazar et al., 1999) and that the survival of these two species could behave in the same way.

In addition, *P. michoacana* has a greater potential for survival than *P. pseudostrabus* and *P. martinezii*, as it has a larger water storage capacity, as indicated by the fresh weight of shoot and root, and incorporates an amount of assimilated carbon as tissues (dry weight) under similar growth conditions. This coincides with the findings by Gómez-Romero et al. (2012) who observed greater survival of *P. michoacana* plants than *P. pseudostrabus* plants at a degraded site.

The values of the aerial part / root ratio (A / R) were between 1.58 and 1.96 in all three species. Previous studies have shown that conifers allocate more carbon to build up the area than the root (Levy et al., 2004; Mokany et al., 2006), which agrees with the results of this experiment. This carbon distribution (A / R ratio) coincides with the allometric biomass distribution theory (Niklas and Enquist, 2001) and indicates that all three species come from similar sites in relation to water availability. In this sense, Cregg (1994) observed greater carbon distribution to shoot in *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws plants. from different locations with high availability of water.

The variables of the root showed no significant difference between *P. martinezii* and *P. pseudostrabus* (Table 2), while the difference between these two species and *P. michoacana* was significant, which is similar to that observed in root weight and the aerial part. Carbon distribution measured through root morphological variables has not been recorded under conditions of sufficient water availability. The specific length of this structure (LER) was

de la LER en dos especies de pino. La LER mostró una relación inversamente proporcional con las variables longitud total de raíces laterales (LTRL), longitud promedio de raíces laterales (LPRL), la densidad de raíces (DR) y volumen de raíz (VR). La diferencia entre *P. pseudostrobus* y *P. martinezii* en relación a *P. michoacana* fue entre 40 y 90 %. La relación inversa entre dichas variables coincide con previos reportes. Ostonen *et al.* (2007) observaron plantas con menor LER y mayor capacidad de exploración de suelo. Por lo tanto, *P. michoacana* podría tener una mayor supervivencia en comparación a las otras especies por su capacidad de explorar más volumen de suelo debido a su menor LER. La relación entre la LER y la mayor exploración de suelo en estas especies de coníferas no depende del número total de raíces laterales, sino que la exploración depende de la longitud de raíces laterales del primer orden.

different among the species evaluated in this experiment and was greater than 100 % in *P. pseudostrobus* and *P. martinezii* in relation to *P. michoacana*. These results coincide with those of King *et al.* (1997), who observed a significant difference of LER in two pine species. LER showed an inversely proportional relation with LTRL, LPRL, root density (DR) and root volume (VR). The difference between *P. pseudostrobus* and *P. martinezii* in relation to *P. michoacana* was between 40 and 90 %. The inverse relationship between these variables coincides with previous studies. Ostonen *et al.* (2007) found plants with lower LER and greater soil exploration capacity. Therefore, *P. michoacana* could have a better survival compared to the other species for its ability to explore more soil volume because of its lower RSI. Such behavior in these species of conifers does not depend on the total number of lateral roots, but the exploration depends on the length of the lateral roots of the first order.

Cuadro 2. Valores promedio de las variables de la raíz.

Especie	LER (cm g ⁻¹)	LTRL (cm)	LPRL (cm)	DR (g cm ⁻³)	VR (cm ³)
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	335.3 ± 22.1 a	182.9 ± 8.0 b	1.3 ± 0.08 b	0.21 ± 0.02 ab	0.49 ± 0.06 b
<i>Pinus martinezii</i> E. Larsen	331.7 ± 43.9 a	199.3 ± 26.9 b	1.0 ± 0.09 b	0.18 ± 0.02 b	0.56 ± 0.04 b
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	154.2 ± 15.0 b	327.9 ± 21.9 a	1.9 ± 0.17 a	0.26 ± 0.01 a	0.83 ± 0.05 a

LER = Longitud específica de raíz; LTRL = Longitud total de raíces laterales por planta; LPRL = Longitud promedio de raíces laterales, DR = Densidad (DR); VR = Volumen de la raíz. ± = Error estándar. Letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa (P < 0.05 y n = 10).

Table 2. Root average values of the three studied species.

Species	LER (cm g ⁻¹)	LTRL (cm)	LPRL (cm)	DR (g cm ⁻³)	VR (cm ³)
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	335.3±22.1 a	182.9±8.0 b	1.3±0.08 b	0.21±0.02 ab	0.49±0.06 b
<i>Pinus martinezii</i> E. Larsen	331.7±43.9 a	199.3±26.9 b	1.0±0.09 b	0.18±0.02 b	0.56±0.04 b
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	154.2±15.0 b	327.9±21.9 a	1.9±0.17 a	0.26±0.01 a	0.83±0.05 a

LER = Specific root length; LTRL = Total length of lateral roots per plant; LPRL = Average length of lateral roots; DR = Density; VR = Volume of the root. ± = Standard error. Different letters indicate significant statistical difference (P < 0.05 and n = 10 individuals per species).

Los valores de morfología de raíz muestran una clara diferencia en la distribución de carbono en las tres especies (Cuadro 3). *P. martinezii* presentó una longitud de la raíz principal y un número de raíces de primer orden mayor significativamente en relación a *P. pseudostrobus* y *P. michoacana*. La longitud y el diámetro de las raíces laterales de primer orden fueron mayores significativamente en *P. michoacana* en relación a las otras dos especies. El mayor diámetro las raíces del primer, segundo y tercer orden se presentó en *P. michoacana* y *P. pseudostrobus* en relación a *P. martinezii*. Estos resultados de morfología de raíz hacen evidente la variación en cuanto a distribución de carbono entre especies de pino y aportan más

The values of root morphology show a clear difference in the carbon distribution in the three species (Table 3). The length of the main root and the number of first order roots was significantly higher in *P. martinezii* than in *P. pseudostrobus* and *P. michoacana*; of the latter, the length and diameter of the first order lateral roots were also found in *P. michoacana* in relation to the other two species. The largest diameter of the roots of the first, second and third order was confirmed in *P. michoacana* and *P. pseudostrobus* compared to that of *P. martinezii*. These results of root morphology make evident the variation in carbon distribution among pine species and provide further evidence that the greater survival of *P. michoacana* could be related

evidencia de que la mayor supervivencia de *P. michoacana* podría estar relacionada con la longitud y diámetro de las raíces laterales, seguido de *P. pseudostrobus* y por último *P. martinezii*.

to the length and diameter of the lateral roots, followed by *P. pseudostrobus* and finally *P. martinezii*.

Cuadro 3. Valores promedio de número, longitud (cm) y diámetro (mm) de raíces laterales en los diferentes ordenes del sistema radical.

	Número de raíces			Longitud de raíz			Diámetro de raíz		
	Pma	Pp	Pmi	Pma	Pp	Pmi	Pma	Pp	Pmi
Principal	1 ± 0.0 a	1 ± 0.0 a	1 ± 0.0 a	30.1 ± 2.4 a	46 ± 0.3 b	46 ± 0.5 b	1.1 ± 0.005 c	1.9 ± 0.009 b	2.4 ± 0.015 a
Primer orden	49 ± 6.6 a	13 ± 0.9 c	16 ± 0.7 b	2.8 ± 0.5 c	8.6 ± 0.8 b	12.6 ± 0.7 a	0.6 ± 0.002 b	0.9 ± 0.004 a	0.9 ± 0.002 a
Segundo orden	108 ± 14.2 a	111 ± 10.1 a	126 ± 10.9 a	0.6 ± 0.1 a	0.7 ± 0.1 a	0.9 ± 0.2 a	0.5 ± 0.001 b	0.7 ± 0.002 a	0.7 ± 0.002 a
Tercer orden	32 ± 7.9 ab	22 ± 3.2 b	39 ± 7.2 a	0.4 ± 0.1 a	0.3 ± 0.1 a	0.4 ± 0.1 a	0.5 ± 0.003 b	0.6 ± 0.001 a	0.6 ± 0.002 a
Cuarto orden	-	0.72 ± 0.5 a	3 ± 1.6 a	-	0.1 ± 0.02 a	0.3 ± 0.20 a	-	0.1 ± 0.0006 a	0.2 ± 0.009 a
Total raíz lateral	189.81 ± 17.8 a	146.72 ± 7.5 b	183.81 ± 14.7 a						

Pma = *Pinus martinezii* E. Larsen; Pp = *Pinus pseudostrobus* Lindl.; Pmi = *Pinus michoacana* Martínez.

± = Error estándar. Letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa (P < 0.05 y n = 10 por especie).

Table 3. Average values of lateral roots in the different orders of the radical system in the three studied pine species.

Root	Number of roots			Root length			Root diameter		
	Pma	Pp	Pmi	Pma	Pp	Pmi	Pma	Pp	Pmi
Main	1 ± 0.0 a	1 ± 0.0 a	1 ± 0.0 a	30.1 ± 2.4 a	46 ± 0.3 b	46 ± 0.5 b	1.1 ± 0.005 c	1.9 ± 0.009 b	2.4 ± 0.015 a
First order	49 ± 6.6 a	13 ± 0.9 c	16 ± 0.7 b	2.8 ± 0.5 c	8.6 ± 0.8 b	12.6 ± 0.7 a	0.6 ± 0.002 b	0.9 ± 0.004 a	0.9 ± 0.002 a
Second order	108 ± 14.2 a	111 ± 10.1 a	126 ± 10.9 a	0.6 ± 0.1 a	0.7 ± 0.1 a	0.9 ± 0.2 a	0.5 ± 0.001 b	0.7 ± 0.002 a	0.7 ± 0.002 a
Third order	32 ± 7.9 ab	22 ± 3.2 b	39 ± 7.2 a	0.4 ± 0.1 a	0.3 ± 0.1 a	0.4 ± 0.1 a	0.5 ± 0.003 b	0.6 ± 0.001 a	0.6 ± 0.002 a
Fourth order	-	0.72 ± 0.5 a	3 ± 1.6 a	-	0.1 ± 0.02 a	0.3 ± 0.20 a	-	0.1 ± 0.0006 a	0.2 ± 0.009 a
Total lateral root	189.81 ± 17.8 a	146.72 ± 7.5 b	183.81 ± 14.7 a						

Pma = *Pinus martinezii* E. Larsen; Pp = *Pinus pseudostrobus* Lindl.; Pmi = *Pinus michoacana* Martínez; ± = Standard error. Different letters indicate significant statistical difference (P < 0.05 and n = 10 individuals per species).

Conclusiones

Existe variación en la distribución de carbono a nivel inter-especie y coincide con el porcentaje de supervivencia. Esta relación no fue consistente mediante variables como peso seco de parte aérea y raíz, proporción parte aérea y raíz, volumen y longitud de raíz, sino que otras variables como longitud específica de raíz (LER), longitud total de raíces laterales, la longitud y el diámetro de raíces por orden de raíz son parámetros con mayor exactitud. Por último, se sugiere que en trabajos posteriores se considere la evaluación morfológica y de tamaño, tanto en parte aérea como de raíz bajo diferentes condiciones de crecimiento para elucidar con mayor exactitud la variación de la distribución de carbono de las especies de coníferas en México y poder incluir la LER como característica morfológica para calificar la calidad de planta.

Conclusions

There is variation in the carbon distribution at inter-species level and coincides with the percentage of survival. This relationship was not consistent with variables such as dry weight of aerial part and root, proportion aerial part and root, volume and root length, but other variables such as root specific length (LER), total length of lateral roots, length and Root diameter by root order are parameters with greater accuracy.

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to Javier Villegas Moreno, Lorena Carreto Montoya and Santos Zepeda Guzmán for their support in this research at the Laboratorio de Interacción Suelo-Planta-Microorganismo of Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Soil-Plant-Microorganism Interaction Laboratory of the Institute of Chemical-Biological Research of the Michoacan University of San Nicolás de Hidalgo). To the Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) for the contribution of the seeds of *Pinus michoacana* and *P. pseudostrobus*.



Agradecimientos

Agradecemos a Javier Villegas Moreno, Lorena Carreto Montoya y Santos Zepeda Guzmán por el apoyo para la realización de esta investigación en el Laboratorio de Interacción suelo-Planta-Microorganismo del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. A la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM) por la aportación de las semillas de *Pinus michoacana* y *P. pseudostrobus*.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Jesús Morales Hernández: obtención de datos y elaboración del escrito; Mariela Gómez Romero: colecta y manejo de semillas de *Pinus martinezii*; así como la revisión del manuscrito; Crisanto Velázquez Becerra: análisis estadístico de los datos y revisión del escrito; Enrique Ambriz Parra: asesoría en todo el experimento y elaboración del manuscrito.

Referencias

- Aranda, I., R. Alía, U. Ortega, Á. K. Dantas and J. Majada. 2010. Intra-specific variability in biomass partitioning and carbon isotopic discrimination under moderate drought stress in seedlings from four *Pinus pinaster* populations. *Trees Genetics and Genomes* 6: 169-178.
- Bloom, A. J., F. S. Chapin and H. A. Mooney. 1985. Resource limitation in plants - an economic analogy. *Annual Review of Ecology & Systematics* 16: 363-392.
- Chambel, M. R., J. Climent and R. Alía. 2007. Divergence among species and populations of Mediterranean pines in biomass allocation of seedlings grown under two water regimes. *Annals of Forest Sciences* 64: 87-97.
- Climent, J., J. Alonso and L. Gil. 2008. Root restriction hindered early allometric differentiation between seedlings of two provenances of Canary Island Pine. *Silvae Genetica* 57: 187-193.
- Clegg, B. M. 1994. Carbon allocation, gas exchange, and needle morphology of *Pinus ponderosa* genotypes known to differ in growth and survival under imposed drought. *Tree Physiology* 14: 883-898.
- Friend, A. L., M. D. Coleman and J. G. Isebrands. 1994. Carbon allocation to root and shoot systems of woody plants. In: Davis, T.D. and B. E. Haassig. *Biology and adventitious root formation*. Plenum Press. New York, NY, USA. pp. 245-273.
- Gómez-Romero, M., J. C. Soto-Correa, J. A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas y R. Lindig-Cisneros 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* 46 (8):795-807.
- Guarnaschelli, A. B., J. H. Lemcoff, P. Prystupa and S. O. Basci. 2003. Responses to drought preconditioning in *Eucalyptus globules* Labill. Provenances. *Trees* 17: 501-509.
- King, J. S., R. B. Thomas and B. R. Strain. 1997. Morphology and tissue quality of seedling root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* as affected by varying CO₂, temperature, and nitrogen. *Plant and Soil* 195 (1): 107-119.
- Levy, P. E., S. E. Hale and B. C. Nicoll. 2004. Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry* 77: 421-430.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Jesús Morales Hernández: data collection and writing of the manuscript; Mariela Gómez Romero: collection and handling of the *Pinus martinezii* seeds, as well as review of the manuscript; Crisanto Velázquez Becerra: data statistical analysis and review of the manuscript; Enrique Ambriz Parra: control and advice of the whole experiment and writing of the manuscript.

End of the English version



- Markestijn, L. and L. Poorter. 2009. Seedlings root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance. *Journal of Ecology* 97: 311-325.
- Mokany, K., R. J. Raison and A. S. Prokushkin. 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12: 84-96.
- Morales H., J. 2014. Desarrollo de estrategias de propagación en vivero para la conservación de *Pinus martinezii* Larsen. Tesis Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 88 p.
- Muñoz F., H. J., G. Orozco G., V. M. Coria A., J. J. García S., Y. Y. Muñoz V. y G. S. Cruz. 2011. Evaluación de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggi* Engelm. con dos densidades de plantación en Michoacán México. *Foresta Veracruzana* 13 (1): 29-35.
- Niklas, K. J. and B. J. Enquist. 2001. Invariant scaling relationships for interspecific plant biomass production rates and body size. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (5):2922-2927.
- Ostonen, I., Ü. Püttsepp, C. Biel, O. Alberton, M. R. Bakker, K. Löhmus, H. Majdi, D. Metcalfe, A. F. M. Olsthoorn, A. Pronk, E. Vanguelova, M. Weih and I. Brunner. 2007. Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems* 141 (3): 426-442.
- Paz, H. 2003. Root/Shoot Allocation and root architecture in seedlings: variation among forest sites, microhabitats, and ecological groups. *Biotropica* 35 (3): 318-332.
- Salazar G., J. G., J. J. Vargas H., J. Jasso M., J. D. Molina G., C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5 (2): 19-34.
- South, D. B. 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. *Forestry and Wildlife Research Series Num. 1*. Auburn University, Auburn, AL, USA. 12 p.



Artículo / Article

Histopatología de raíces de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. y de *Pinus pseudostrobus* Lindl. infectadas con *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922

Histopathology of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. and *Pinus pseudostrobus* Lindl. roots infected by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922

Santos Gerardo Leyva Mir¹, Nancy Patricia Nava García², Betsabé Diego Martínez¹, Alejandra Almaraz Sánchez³, Silvia Mariel Hernández Villalobos⁴ y Juan Manuel Tovar Pedraza¹

Resumen

Phytophthora cinnamomi es uno de los fitopatógenos más devastadores a nivel mundial, ya que ocasiona pudriciones de raíz y la muerte de numerosas especies vegetales. El objetivo de este estudio fue determinar los daños histológicos inducidos por este organismo a nivel radicular en *Pinus patula* y *Pinus pseudostrobus*. Se inocularon 48 árboles de 11 meses de edad de ambas especies forestales mediante la inmersión de sus raíces en una suspensión de fragmentos miceliales y como testigo, otras que fueron sumergidas en agua destilada estéril. Se tomaron muestras de tales estructuras cada cuatro días después de la inoculación por 20 días. Los síntomas microscópicos se manifestaron con mayor rapidez en *P. pseudostrobus*, aunque en las dos especies las raíces se tornaron frágiles y se necrosaron. Asimismo, los cambios histológicos se presentaron como un aumento en el contenido de polifenoles, degradación de las paredes celulares y necrosamiento de la peridermis. En *P. patula*, las plantas mostraron un marchitamiento de la copa, seguida por un amarillamiento de las acículas y, finalmente, en la muerte del árbol. Para *P. pseudostrobus* los síntomas fueron similares, pero el decaimiento de las acículas fue gradual y, posteriormente, se observó marchitez de las mismas hasta la muerte total del ejemplar.

Palabras clave: Cambios anatómicos, oomicete, patogenicidad, *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Abstract

Phytophthora cinnamomi is one of the most devastating plant pathogens worldwide, since it causes root rot and death of many plant species. The aim of this study was to determine the histological damage induced by this organism in roots of *Pinus patula* and *P. pseudostrobus*. Both *Pinus* species were inoculated by immersion of roots in a suspension of mycelial fragments. Roots of control trees were immersed in sterile distilled water. Root samples were taken every four days after inoculation for 20 days. Microscopic symptoms occurred more rapidly in *P. pseudostrobus*, although the two species exhibited fragile and necrotic roots. Also, the histological changes at the root of both species were presented with an increase in polyphenol content, degradation of cell walls and necrosis of the periderm. In the case of *P. patula*, plants showed wilting of the canopy, followed by a yellowing of needles and finally with the death of the tree. For *P. pseudostrobus* symptoms were similar, but in this case the decay of needles was gradual and subsequently wilt thereof was observed until the total death of the tree.

Key words: Anatomic changes, oomycete, pathogenicity, *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Fecha de recepción/ Reception date: 7 de julio de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 22 de diciembre de 2016.

¹ Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, México. Correo-e: jmtovar@colpos.mx

² Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, México.

³ Fitopatología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, México.

⁴ Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Costa Rica.

Introducción

Phytophthora cinnamomi Rands, 1922 es un patógeno del suelo causante de pudrición de la raíz, que en el siglo pasado devastó 200 mil hectáreas de vegetación natural en Australia, y destruyó a más de 400 especies hospedantes (Malajczuk, 1979). Es también responsable de serias pérdidas anuales de castaño (*Castanea sativa* Miller), plantas de arándano (*Vaccinium myrtillus* L.) y plantas ornamentales dentro de los viveros forestales de Estados Unidos de América. Este patógeno se ha registrado, además, en Argentina, España, Sudáfrica, Sudamérica y Taiwán donde ataca a un amplio número de hospederos (Zentmyer, 1980; Robin *et al.*, 1992; Brasier *et al.*, 1993; Erwin y Ribeiro, 1996). En México, *Ph. cinnamomi* ha causado daños en extensas áreas productoras de aguacate (*Persea americana* L.), como en Atlixco, Puebla, cuyo cultivo ha desaparecido de grandes regiones (Téliz y Mora, 2007). Además, incide en especies forestales en los bosques de El Arrayanal, en el estado de Colima, donde provocó la muerte de árboles de encino (Tainter *et al.*, 2000); lo mismo ocurrió en Tecoaapa, Guerrero (Alvarado *et al.*, 2008).

Este oomicete fitopatógeno es muy agresivo para las plantas, y repercute en aspectos económicos diversos (Hardham, 2005). Los síntomas característicos de la enfermedad a partir del daño radicular, consisten en clorosis del follaje, su marchitamiento y en un rápido desprendimiento del mismo, lo que propicia una reducción en la transpiración (Erwin y Ribeiro, 1996; Moralejo *et al.*, 2009). Ingresa a la planta a través de la raíz y también invade la base del tronco de su hospedante, pero las plantas poseen mecanismos de defensa que impiden que el organismo avance, limitando su infección; algunas de estas defensas son las barreras bioquímicas preformadas y los compuestos fenólicos. La resistencia de la planta a los patógenos que afectan la raíz con frecuencia se evalúa a nivel histológico (Glazebrook, 2005; Obwald *et al.*, 2014). Por lo anterior, los objetivos de este estudio consistieron en determinar la susceptibilidad de plántulas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. y *P. pseudostrobus* Lindl. a la infección por *Phytophthora cinnamomi*, así como realizar un análisis histológico de la raíz para describir los daños inducidos por este hongo.

Materiales y Métodos

Se trabajó con 48 árboles de 11 meses de edad donados por el vivero forestal Molino de las Flores, a razón de 24 individuos por especie (*P. patula* y *P. pseudostrobus*), que se mantuvieron en condiciones de invernadero, para posteriormente ser inoculados. El experimento se realizó en dos etapas: la primera fase consistió en la incorporación de *Phytophthora cinnamomi* en las plantas, mientras que la segunda se basó en el proceso histológico de las muestras inoculadas; se seleccionaron las especies forestales citadas, debido a su amplio intervalo de adaptación y a su importancia comercial.

Introduction

Phytophthora cinnamomi Rands, 1922 is a soil pathogen that causes root rot, which in the last century devastated 200 000 hectares of natural vegetation in Australia, and destroyed more than 400 host species (Malajczuk, 1979). It is also responsible for serious annual losses of chestnut (*Castanea sativa* Miller), cranberry plants (*Vaccinium myrtillus* L.) and ornamental plants within the forest nurseries of the United States of America. This pathogen has also been reported in Argentina, Spain, South Africa, South America and Taiwan where it attacks a large number of hosts (Zentmyer, 1980; Robin *et al.*, 1992; Brasier *et al.*, 1993; Erwin and Ribeiro, 1996). In Mexico, *Ph. cinnamomi* has caused extensive damage to areas producing avocado (*Persea americana* L.), as in Atlixco, Puebla, where the crop has disappeared from large regions (Téliz and Mora, 2007). In addition, it affects species in El Arrayanal forests, in the state of Colima, where it caused the death of oak trees (Tainter *et al.*, 2000); the same is true in Tecoaapa, Guerrero (Alvarado *et al.*, 2008).

This phytopathogenic oomycete is very aggressive to plants, and has repercussions on diverse economic aspects (Hardham, 2005). The typical symptoms of this disease from root damage are foliar chlorosis, their wilting and rapid detachment, leading to a reduction in transpiration (Erwin and Ribeiro, 1996; Moralejo *et al.*, 2009). It enters the plant through the root and also invades the base of the trunk of its host, but the plants have defense mechanisms that prevent the organism from advancing, limiting its infection; some of these defenses are preformed biochemical barriers and phenolic compounds. Plant resistance to root-affecting pathogens is frequently assessed histologically (Glazebrook, 2005; Obwald *et al.*, 2014). Therefore, the objectives of this study were to determine the susceptibility of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. and *P. pseudostrobus* Lindl. to infection by *Phytophthora cinnamomi*, as well as performing a histological analysis of the root to describe the damage induced by this fungus.

Materials and Methods

A total of 48 trees of 11 months of age were donated by the Molino de las Flores forest nursery with 24 individuals per species (*P. patula* and *P. pseudostrobus*), which were kept in greenhouse conditions, to be inoculated later. The experiment was carried out in two stages: the first phase consisted of the incorporation of *Phytophthora cinnamomi* in the plants, while the second one was based on the histological process of the inoculated samples; the aforementioned forest species were selected because of their wide range of adaptation and their commercial importance.



Prueba de patogenicidad

Se aplicó el método de inoculación de sustrato con micelio, que consiste en tomar colonias de *Phytophthora cinnamomi* para obtener inóculo a una concentración de 3.3×10^8 fragmentos miceliales. Los árboles se inocularon a raíz desnuda por inmersión en la suspensión de fragmentos miceliales durante 3 h; como testigo se usaron 12 plantas de cada especie, a las cuales se les sumergió la raíz solo en agua destilada estéril. Una vez pasadas las 3 h, cada árbol se plantó en un sustrato estéril compuesto por Peat Moss y tierra de monte estéril en una relación de 3:1. Las plantas se sometieron a 100 % de humedad relativa y una temperatura 22 ± 3 °C durante 72 h; se mantuvieron en el invernadero en condiciones de manejo normal.

Antes de la aparición de síntomas, se obtuvieron muestras de raíces de 10 mm de longitud, tanto de los árboles inoculados como de los testigo. Una vez que se observaron los primeros indicios de daño, se tomaron las siguientes muestras, para lo cual se realizó un corte de la raíz de aproximadamente 1 cm, que se sumergió en una solución fijadora a base de una mezcla de formaldehído, ácido acético glacial, agua destilada y alcohol etílico al 96 % (FAA). En total se realizaron seis recolecciones de muestras de cada especie de *Pinus* a intervalos de 4 días a partir de la inoculación.

Análisis histológico

Para el procesamiento de las muestras para estudios histológicos, se siguió el procedimiento modificado descrito por Leyva *et al.* (2012) y Tovar *et al.* (2012). Para ello, se lavaron muestras de raíz fijadas en la solución de FAA con agua corriente durante 10 min y se infiltraron en un procesador automático de tejidos modelo 4640-B (Tissue-Tek II®). La deshidratación se realizó en una serie gradual de alcohol etílico (30, 50, 70, 85, 96 y 100 %), después de lo cual se pasaron por una mezcla de etanol absoluto-xileno (1:1) y tres cambios de xileno al 100 % a intervalos de 2 h en cada uno de los cambios. La inclusión en Paraplast (Sigma®) se llevó a cabo durante 96 h.

Con la ayuda de un micrótopo de rotación Spencer 820 (American Optical®) se obtuvieron cortes transversales de 10 µm de cada muestra, mismos que se colocaron en baño de flotación a 45-50 °C. Bajo estas condiciones los cortes se extendieron y adhirieron a los portaobjetos. Los cortes obtenidos se desparafinaron en tres cambios de xileno absoluto (3 min cada uno). Paso seguido, las se hidrataron en alcohol etílico al 100, 96 y 70 % (3 min en cada cambio); se tiñeron con safranina (Sigma®) al 1 % durante 24 h y se enjuagaron con agua corriente hasta que el agua se tornó cristalina. Enseguida, las secciones se lavaron con alcohol etílico al 50, 70 y 96 % (3 min cada uno) más ácido pícrico y se tiñeron con verde rápido (Química Técnica®) durante 10 s. Después, se lavaron con aceite de clavo para retirar el exceso de colorante y se aclararon con una mezcla de aceite

Pathogenicity test

The inoculation method of substrate with mycelium was applied, which consists of taking colonies of *Phytophthora cinnamomi* to obtain inoculum at a concentration of 3.3×10^8 mycelial fragments. The trees were inoculated bare root by immersion in the suspension of mycelial fragments for 3 h; 12 plants of each species were used as a control, to which their root was put just into sterile distilled water. After 3 h, each tree was planted on a sterile substrate composed of Peat Moss and sterile forest soil in a ratio of 3:1. The plants were subjected to 100 % relative humidity and at 22 ± 3 °C for 72 h and were kept in the greenhouse under normal handling conditions.

Before the onset of symptoms, root samples of 10 mm in length were obtained from both inoculated and control trees. Once the first signs of damage were observed, the following samples were taken, for which a root cut of approximately 1 cm was made, which was immersed in a fixative solution based on a mixture of formaldehyde, glacial acetic acid, distilled water and 96 % ethyl alcohol (FAA). In total, six samples were collected from each species of *Pinus* at 4-day intervals after inoculation.

Histological analysis

For the processing of the samples for histological studies, the modified procedure described by Leyva *et al.* (2012) and Tovar *et al.* (2012) was used. Thus, root samples fixed in the FAA solution were washed with running water for 10 min and infiltrated in an automated tissue processor model 4640-B (Tissue-Tek II™). Dehydration was carried out in a gradual series of ethyl alcohol (30, 50, 70, 85, 96 and 100 %), after which they were passed through a mixture of absolute ethanol-xylene (1:1) and three xylene changes at 100 % at 2 h intervals in each of the changes. Inclusion in Paraplast (Sigma™) was carried out for 96 h.

With the aid of a Spencer 820 (American Optical®) rotating microtome, 10 µm cross sections of each sample were obtained, which were placed in a flotation bath at 45-50 °C. Under these conditions the cuts were spread and adhered to the slides. The cuts were dewaxed in three changes of absolute xylene (3 min each). Subsequently, they were hydrated in ethyl alcohol at 100, 96 and 70 % (3 min at each change), and stained with safranin (Sigma™) 1 % for 24 h and rinsed with running water until the water became crystalline. The sections were then washed with 50, 70 and 96 % ethyl alcohol (3 min each) plus picric acid and stained with rapid green (Technical Chemistry™) for 10 s. Afterwards, they were washed with clove oil to remove excess dye and rinsed with a mixture of clove oil, xylene and absolute ethanol. To conclude, the samples were placed in 100 % xylene, mounted on synthetic resin and examined in a composite microscope (Olympus BX41).

de clavo, xileno y etanol absoluto. Para finalizar, las muestras se colocaron en xileno al 100 %, se montaron en resina sintética y se examinaron en un microscopio compuesto (*Olympus BX41*).

Resultados y Discusión

Prueba de patogenicidad

Phytophthora cinnamomi indujo diferentes síntomas según el tiempo de infección en las dos especies de *Pinus* inoculadas artificialmente, mientras que las plantas testigo no presentaron ningún cambio apreciable y permanecieron asintomáticas (Figura 1A y 2A). Cuatro días después de la inoculación (ddi), las plantas de *P. patula* mantuvieron su vigor y su apariencia (Figura 1B), además de que no exhibieron signos del patógeno. A los 8 ddi los árboles mostraron severo decaimiento de acículas, a partir de la sección superior del árbol (Figura 1C). A los 12 ddi, aunado al decaimiento del árbol, se apreció amarillamiento de las acículas, y, en la base del árbol, algunas de ellas se secaron y adquirieron una coloración amarilla y café-clara (Figura 1D). A los 16 ddi la deshidratación de acículas se tornó más evidente y la parte de arriba del tallo tomó una coloración grisácea (Figura 1E). A los 20 ddi los árboles estaban secos en más de tres cuartas partes y tenían color café intenso, además de pérdida de vigor y a los 24 ddi estaban completamente secos (Figura 1F).

Results and Discussion

Pathogenicity test

Phytophthora cinnamomi induced different symptoms according to the infection time in the two artificially inoculated *Pinus* species, whereas the control plants showed no appreciable change and remained asymptomatic (Figure 1A and 2A). Four days after inoculation (dai), *P. patula* plants maintained their vigor and appearance (Figure 1B), in addition to showing no signs of the pathogen. At 8 dai the trees showed severe decay of needles, from the upper section of the tree (Figure 1C). At 12 dai, together with the decay of the tree, yellowing of the needles was observed, and at the base of the tree some of them dried and got a yellow and light brown coloration (Figure 1D). At 16 dai the dehydration of needles became more evident and the top of the stem took a greyish colouration (Figure 1E). At 20 dai, the trees were dry in more than three-quarters and had an intense brown color in addition to loss of vigor and at 24 dai were completely dry (Figure 1F).

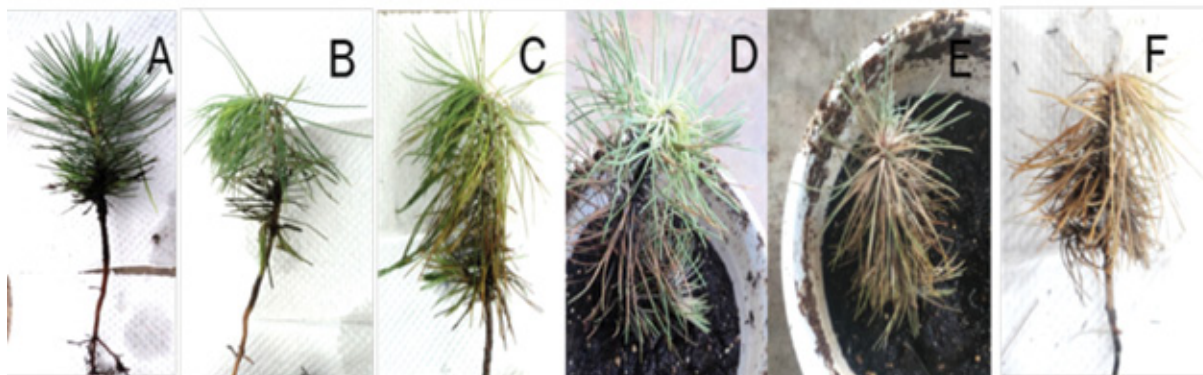


Figura 1. Síntomas causados por *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922 en plántulas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. observados a diferentes días después de la inoculación (ddi). (A) Planta testigo, B) Planta a 4 ddi, C) Planta a 8 ddi, D) Planta a 12 ddi, E) Planta a 16 ddi, F) Planta a 20 ddi.

Figure 1. Symptoms caused by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922 in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. seedlings observed at different days after inoculation (dai). (A) Control plant, B) Plant at 4 dai, C) Plant at 8 dai, D) Plant at 12 dai, E) Plant at 16 dai, F) Plant at 20 dai.

Por otra parte, los ejemplares de *P. pseudostrobus* inoculados no exhibieron signos que indicaran la presencia del patógeno, además de que conservaron su tono y su vigor hasta los 4 ddi (Figura 2B). A los 8 ddi se pudo distinguir un muy ligero decaimiento de acículas, las cuales empezaron a perder turgencia (Figura 2C). A los 12 ddi los árboles experimentaron un decaimiento visible de acículas con un amarillamiento incipiente (Figura 2D). A los

On the other hand, the inoculated *P. pseudostrobus* did not show signs indicating the presence of the pathogen, in addition to maintaining their tone and vigor until 4 dai (Figure 2B). At 8 dai it was possible to distinguish a very slight decay of needles, which began to lose turgor (Figure 2C). At 12 dai the trees experienced a visible decay of needles with incipient yellowing (Figure 2D). At 16 dai the weakening of the same

16 ddi el debilitamiento de las mismas prevaleció y comenzó a destacarse un color café claro en ellas (Figura 2E). A los 20 ddi estas estructuras ya no tenían turgencia y la mayor parte del árbol se cambió hacia un tono café (Figura 2F).

Los daños que evidenció la parte aérea de las plantas de *P. patula* fueron ostensibles a partir de la declinación del árbol, que consistió en un marchitamiento de la copa; a esto continuó un amarillamiento de las acículas para después tornarse café y luego marrón, lo que continuó hasta que el árbol quedó completamente seco. Las acículas se hicieron frágiles y se desprendían con facilidad, y, por su parte, las raíces se volvieron quebradizas y con necrosis.

En *P. pseudostrobus* los síntomas fueron semejantes, con la diferencia de que el decaimiento de las acículas fue gradual, es decir más lento, sin embargo, después se verificó su amarillamiento hasta que el árbol estuvo muerto. De igual forma, las raíces se tornaron frágiles y necrosadas. El aspecto anterior coincidió con lo descrito por Zentmyer (1980) y Chavarriga et al. (2007) para ejemplares de *Pinus* spp. infectados por *Phytophthora cinnamomi*.

Análisis histológico de raíces de *P. patula*

Los árboles testigo no registraron cambios significativos durante todo el proceso. El corte histológico correspondiente a las raíces de estos ejemplares reveló la presencia de la peridermis, conformada por una capa de células lignificadas (esclereidas) y por la hipodermis ubicada por debajo de la capa anterior (Figura 3A). El floema y el xilema no exhibieron ninguna alteración ni estructuras fúngicas (Figura 3B).

prevaleció and a light brown color began to appear in them (Figure 2E). At 20 dai these structures no longer had turgor and most of the tree changed to a brown tone (Figure 2F).

The damages that the aerial part of the plants of *P. patula* evidenced were ostensible from the decline of the tree, which consisted of a wilting of the crown; to this continued a yellowing of the needles to later become brown and then redish-brown, which continued until the tree was completely dry. The needles became fragile and easily detached, and the roots became brittle and necrotic.

In *P. pseudostrobus* the symptoms were similar, with the difference that the decay of the needles was gradual, i. e. slower, however, afterwards their yellowing was verified until the tree was dead. Similarly, the roots became brittle and necrotic. The previous aspect coincided with that described by Zentmyer (1980) and Chavarriga et al. (2007) for specimens of *Pinus* spp. infected by *Phytophthora cinnamomi*.

Histological analysis of roots of *P. patula*

Control trees did not register significant changes throughout the process. The histological cut corresponding to the roots of the controls revealed the presence of the periderm, made up of a layer of lignified cells (sclereids) and the hypodermis located below the previous layer (Figure 3A). Phloem and xylem exhibited no alteration or fungal structures (Figure 3B).

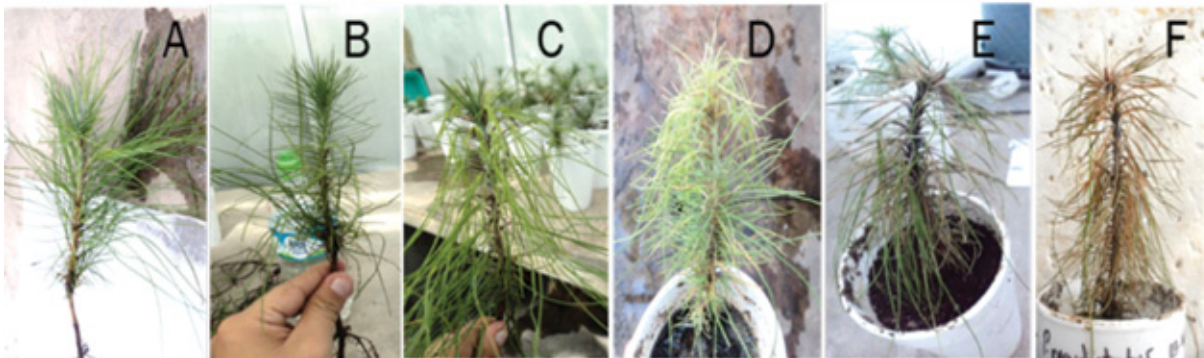


Figura 2. Síntomas causados por *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922 en plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. observados a diferentes días después de la inoculación (ddi). (A) Planta testigo, B) Planta a 4 ddi, C) Planta a 8 ddi, D) Planta a 12 ddi, E) Planta a 16 ddi, F) Planta a 20 ddi.

Figure 2. Symptoms caused by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922 in *Pinus pseudostrobus* Lindl. seedlings observed at different days after inoculation (dai). (A) Control plant, B) Plant at 4 dai, C) Plant at 8 dai, D) Plant at 12 dai, E) Plant at 16 dai, F) Plant at 20 dai.

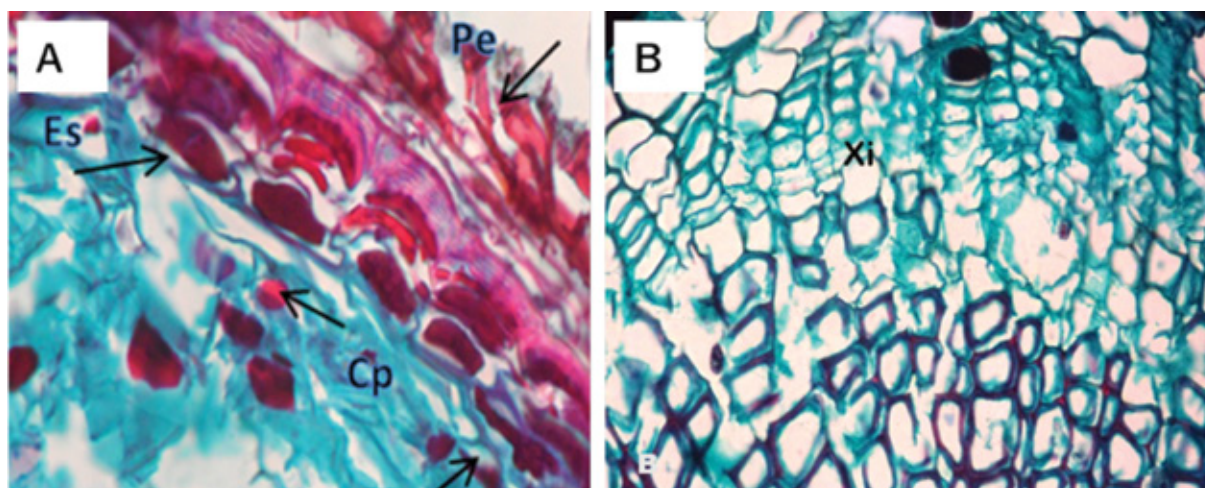


Figura 3. Microfotografía de corte transversal de raíz sana de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. A) Vista de peridermis (Pe), contenido de polifenoles (Cp) y esclereidas (Es). B) Floema (Flo) y xilema (Xi).
 Figure 3. Cross-sectional micrograph of a healthy root of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. A) View of periderm (Pe), content of polyphenols (Cp) and sclereids (Es). B) Phloem (Flo) and xylem (Xi).

El análisis histológico de raíces recolectadas a los 4 ddi no mostró modificaciones importantes, ya que la estructura celular (peridermis, floema y xilema) se mantuvo en orden. Sin embargo, se observaron indicios de polifenoles en las células del xilema (Figura 4A). A los 8 ddi, en este último ocurrió desprendimiento de paredes, pero sin taponamiento de haces vasculares, ni existencia de cuerpos fúngicos, y, al igual que en la muestra anterior, el contenido de polifenoles fue muy escaso (Figura 4B). A los 12 ddi, se identificó una reducción en los polifenoles en el xilema, que fueron densos y más grandes que en los materiales colectados a los 8 ddi, además de que hubo necrosamiento en la peridermis, aunque aún conservó su estructura (Figura 4C y D). En las muestras recolectadas a los 16 ddi se advirtió adelgazamiento de la peridermis, nula presencia de esclereidas y estabilidad en el contenido de polifenoles (Figura 4E). A los 20 ddi se formó una textura rugosa de las paredes del xilema, lo que es atípico en el tejido sano (Figura 4F). Asimismo, a los 32 ddi, los árboles mostraron necrosis generalizada en la peridermis de la raíz y los tejidos como el xilema y el floema ya no fueron reconocibles (Figura 4G).

Análisis histológico de raíces de *P. pseudostrobus*

Al igual que en *P. patula*, los árboles testigo no presentaron cambios significativos en ningún momento. La estructura del corte histológico correspondiente a sus raíces estaba constituida por la peridermis, que a su vez estaba conformada por una capa de células lignificadas (esclereidas), por debajo de la cual se identificó la hipodermis. El floema no sufrió alteraciones y el xilema no exhibió células con polifenoles ni estructuras fúngicas.

A los 4 ddi, la muestra histológica de los árboles inoculados de *P. pseudostrobus* mostró presencia moderada de polifenoles en el

The histological analysis of roots collected at 4 dai did not show any significant modifications, since the cellular structure (periderm, phloem and xylem) remained in order. However, evidence of polyphenols was observed in xylem cells (Figure 4A). At 8 dai, in the latter, there was wall detachment, but no vascular bundle obstruction, nor existence of fungal bodies, and, as in the previous sample, the polyphenol content was very scarce (Figure 4B). At 12 dai, a reduction in the polyphenols in the xylem was observed, which were dense and larger than in the materials collected at 8 dai, in addition to necrosis in the periderm, although the latter still retained its structure (Figure 4C and D). In the samples collected at 16 dai it was noticed thinning of the periderm, null presence of sclereids and stability in the content of polyphenols (Figure 4E). At 20 dai, a rough appearance of the xylem walls was found, which is atypical in healthy tissue (Figure 4F). Also, at 32 dai, trees showed generalized necrosis in the root periderm and tissues such as xylem and phloem were no longer recognizable (Figure 4G).

Histological analysis of roots of *P. pseudostrobus*

As in *P. patula*, control trees showed no significant changes at any time. The structure of the histological cut corresponding to its roots was constituted by the periderm, which in turn was conformed by a layer of lignified cells (sclereids), below which the hypodermis was identified. The phloem did not suffer alterations and the xylem did not exhibit cells with polyphenols or fungal structures.

At 4 dai, the histological sample of the inoculated trees of *P. pseudostrobus* showed moderate presence of polyphenols in the xylem (Figure 5A and B). At 8 dai it revealed a large number of them in both the xylem and the phloem, in addition

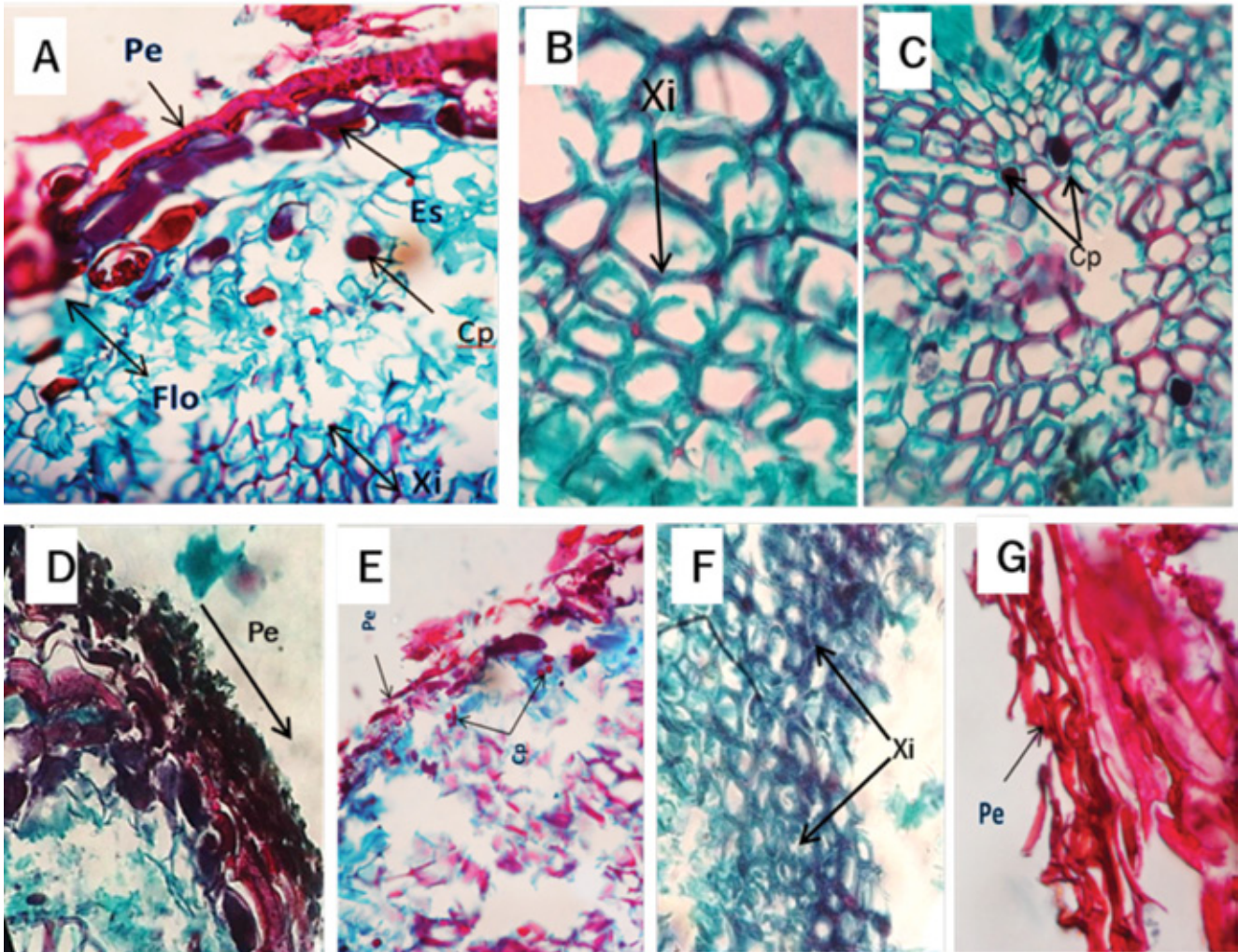


Figura 4. Microfotografía de corte transversal de la raíz de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. infectada por *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922. A) Peridermis (Pe), esclereidas (Es) floema (Flo), contenido de polifenoles (Cp) y xilema (Xi) a los 4 días después de la inoculación (ddi). B) Corte trasversal de raíz con alteraciones de los tejidos, observándose desprendimiento de las paredes del xilema (Xi) a los 8 ddi. C y D) Corte trasversal de raíz con presencia de polifenoles (Cp) en el xilema a los 12 ddi. E) Peridermis (Pe) y contenido de polifenoles (Cp) a los 16 ddi. F) Corte trasversal de raíz mostrando xilema (Xi) con paredes rugosas a los 20 ddi. G) Peridermis (Pe) a los 32 ddi.

Figure 4. Cross-sectional micrograph of the *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. root infected by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922. A) Periderm (Pe), sclereids (Es) phloem (Flo), content of polyphenols (Cp) and xylem (Xi) at 4 days after inoculation (dai). B) Root cross section with alterations of the tissues, observing detachment of the xylem walls (Xi) at 8 dai. C and D) Root cross section with presence of polyphenols (Cp) in the xylem at 12 dai. E) Periderm (Pe) and content of polyphenols (Cp) at 16 dai. F) Root cross section showing xylem (Xi) with rough walls at 20 dai. G) Periderm (Pe) at 32 dai.

xilema (Figura 5A y B). A los 8 ddi reveló una gran cantidad de ellos tanto en el xilema como en el floema, además de la formación de tífides en los vasos del xilema (Figura 5C). A los 12 ddi se observó un adelgazamiento de la peridermis, mayor número de polifenoles e incluso incremento del tamaño en las células del floema (Figura 5D). A los 16 ddi el corte histológico del xilema mostró un engrosamiento de sus paredes (Figura 5E). A los 20 ddi se verificó una completa desorganización celular de los elementos de la raíz (Figura 5F) y a los 32 ddi los árboles se murieron.

to the formation of tyloses in the xylem vessels (Figure 5C). At 12 dai, there was a thinning of the periderm, a greater number of polyphenols and even an increase in size in phloem cells (Figure 5D). At 16 dai the histological section of the xylem showed a thickening of its walls (Figure 5E). At 20 dai, a complete cellular disorganization of the root elements was verified (Figure 5F) and at 32 dai the trees died.



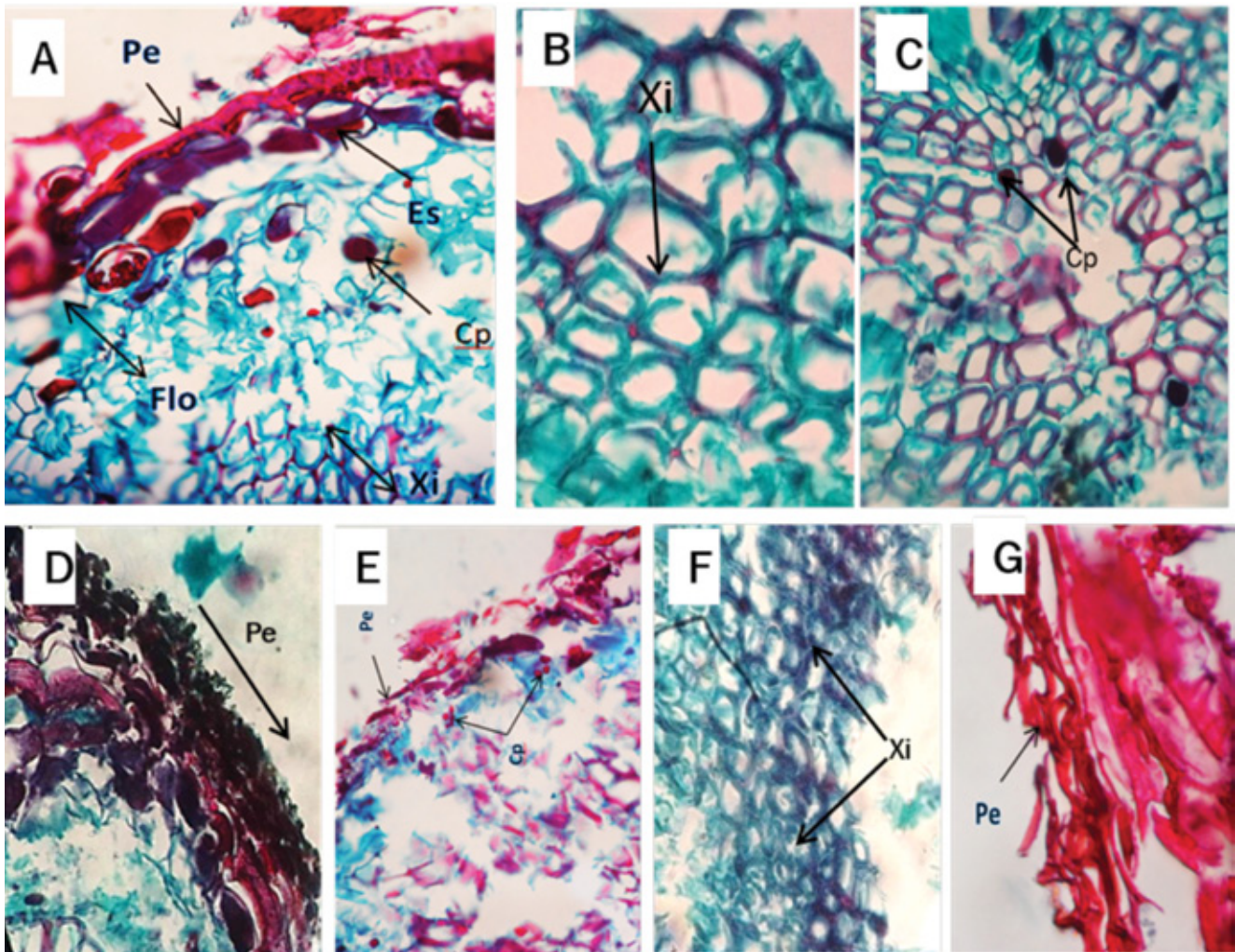


Figura 5. Microfotografía de corte transversal de la raíz de *Pinus pseudostrobus* Lindl. infectada por *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922. A y B) Presencia de polifenoles (Cp) en el xilema a los 4 días después de la inoculación (ddi). C) Tílides (Ti) en el xilema a los 8 ddi. D) Peridermis (Pe), contenido de polifenoles (Cp) y floema (Flo) a los 12 ddi. E) Xilema normal (XiN) y xilema engrosado (XiE) a los 16 ddi. F) Peridermis (Pe) a los 20 ddi.

Figure 5. Cross-sectional micrograph of the root of *Pinus pseudostrobus* Lindl. infected by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922. A and B) Presence of polyphenols (Cp) in the xylem at 4 days after inoculation (dai). C) Tyloses (Ti) in the xylem at 8 dai. D) Periderm (Pe), content of polyphenols (Cp) and phloem (Flo) at 12 dai. E) Normal xylem (XiN) and thickened xylem (XiE) at 16 dai. F) Periderm (Pe) at 20 dai.

En el análisis histológico realizado en plantas de *P. patula* infectadas por *Ph. cinnamomi* se observó daño en el floema y en menor medida en el xilema, comportamiento propio de la infección por especies del género *Phytophthora* generalmente desarrollado como producto de la invasión de hifas sobre la corteza (Brummer *et al.*, 2002; Oh y Hansen, 2007; Horta *et al.*, 2010; Portz *et al.*, 2011). Además, el xilema exhibió desprendimiento celular, lo que indica la pérdida severa de turgencia, y degradación de las paredes celulares, probablemente por efecto de las enzimas extracelulares como pectinas, las cuales son producidas por especies de *Phytophthora* (Brummer *et al.*, 2002). Asimismo, se detectaron polifenoles y necrosamiento de

In the histological analysis carried out on *P. patula* plants infected with *Phytophthora cinnamomi*, phloem and, to a lesser extent, xylem damage, were observed. This behavior is typical of the infection of species of the genus *Phytophthora* generally developed as a result of the invasion of hyphae on the bark (Brummer *et al.*, 2002; Oh y Hansen, 2007; Horta *et al.*, 2010; Portz *et al.*, 2011). In addition, xylem exhibited cellular detachment, indicating severe loss of turgidity and degradation of cell walls was probably recognized by extracellular enzymes such as pectins, which are produced by *Phytophthora* species (Brummer *et al.*, 2002). Also, polyphenols and periderm necrosis were detected, which is common in infections induced by *Phytophthora* spp. (Erwin and Ribeiro, 1996).

la peridermis, lo cual es común en infecciones inducidas por el hongo. (Erwin y Ribeiro, 1996).

Por otra parte, las plantas inoculadas de *P. pseudostrabus* mostraron el xilema menos afectado en comparación con el floema, además de que hubo una gran concentración de polifenoles, principalmente en el xilema. Esto pudiera deberse a que la síntesis y la acumulación de fenoles aumenta después de haberse producido la infección; varios de estos compuestos son potentes inhibidores de diversas enzimas hidrolíticas incluyendo las pectolíticas. Se observaron tálides en los vasos del xilema, que debido a su tamaño y abundancia, pueden obstruir los vasos por completo y bloquear, así, el avance del patógeno. En general, las variedades vegetales que forman pocas tálides o ninguna frente al patógeno son siempre susceptibles a las enfermedades (Agrios, 2005).

Los tejidos presentaron engrosamiento de las paredes celulares debido a una plasmólisis por un desequilibrio grave en la osmorregulación de las raíces, así como necrosamiento de la peridermis.

A pesar de confirmar diversos cambios en los tejidos internos de la raíz, no se detectaron hifas de *Ph. cinnamomi*, debido, tal vez, a que varias de *Phytophthora* spp. son capaces de infectar directamente el tronco de ciertas especies hospedantes por medio de lenticelas, raíces adventicias o heridas, y luego invaden y destruyen con suma rapidez la corteza y el tejido del floema. Tal es el caso de la acción del patógeno referido sobre *Eucalyptus marginata* Donn ex Sm. (Hardy et al., 1996) y *E. calophylla* Lindl. (O'Gara et al., 1997), que invadió a los ejemplares por el tronco. Sin embargo, estudios realizados por Ruiz et al. (2015) en plantas de *Quercus ilex* L. de seis meses de edad e inoculadas con *Ph. cinnamomi*, registraron una colonización del apoplasto y penetración en las células corticales. Al llegar a los tejidos parenquimatosos del cilindro central, el hongo desarrolló diferentes estructuras reproductivas dentro de la célula y provocó algunas respuestas por parte del hospedante como el engrosamiento de la pared celular y la acumulación de compuestos fenólicos.

Conclusiones

Las raíces de *Pinus pseudostrabus* y de *Pinus patula* infectadas con *Phytophthora cinnamomi* mostraron diversas alteraciones histológicas como aumento del contenido de polifenoles, degradación de paredes celulares, presencia de tálides y necrosamiento de la peridermis. Las alteraciones fueron más ostensibles en los árboles de *P. pseudostrabus*.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Elizabeth Cárdenas Soriano por el apoyo otorgado durante la interpretación de los

On the other hand, the inoculated plants of *P. pseudostrabus* showed the less affected xylem in comparison to the phloem, in addition to that there was a great concentration of polyphenols, mainly in the xylem. This could be explained by the synthesis and accumulation of phenols increases after infection has occurred; several of these compounds are potent inhibitors of various hydrolytic enzymes including the pectolytics. Tyloses were observed in the vessels of the xylem, which because of their size and abundance, can obstruct the vessels completely and thus block the progression of the pathogen. In general, plant varieties that form few tyloses or none against the pathogen are always susceptible to diseases (Agrios, 2005).

The tissues showed thickening of the cell walls due to a plasmolysis from a serious imbalance in the osmoregulation of the roots, as well as necrosis of the periderm.

Despite confirming various changes in the internal tissues of the root, no hyphae of *Ph. cinnamomi* were detected, perhaps due to several of *Phytophthora* spp. Are capable of directly infecting the trunk of certain host species by means of lenticels, adventitious roots, or wounds, and then rapidly invade and destroy the bark and phloem tissue. Such is the case of the action of the pathogen on *Eucalyptus marginata* Donn ex Sm. (Hardy et al., 1996) and *E. calophylla* Lindl. (O'Gara et al., 1997), which invaded the specimens by the trunk. However, studies by Ruiz et al. (2015) in six-month-old *Quercus ilex* L. plants inoculated with *Ph. cinnamomi* recorded colonization of apoplast and penetration into cortical cells. Upon reaching the parenchymal tissues of the central cylinder, the fungus developed different reproductive structures within the cell and caused some host responses such as thickening of the cell wall and accumulation of phenolic compounds.

Conclusions

The roots of *Pinus pseudostrabus* and *Pinus patula* infected with *Phytophthora cinnamomi* showed diverse histological alterations such as increase of polyphenol content, degradation of cell walls, presence of tyloses and necrosis of the periderm. The alterations were more evident in the trees of *P. pseudostrabus*.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. Elizabeth Cárdenas Soriano for the support given during the interpretation of results. Likewise, to Dr. Guadalupe Valdovinos Ponce, from *Colegio de Postgraduados* for facilitating the laboratory equipment to perform the histological analysis.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

resultados. Asimismo, a la Dra. Guadalupe Valdovinos Ponce, del Colegio de Postgraduados por facilitar el equipo de laboratorio para la realización del análisis histológico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Santos Gerardo Leyva Mir: definición del estudio, toma de datos y redacción del manuscrito; Nancy Patricia Nava García y Betsabé Diego Martínez: prueba de patogenicidad y análisis histopatológico; Alejandra Almaraz Sánchez: análisis histopatológico; Silvia Mariel Hernández Villalobos: prueba de patogenicidad y revisión del manuscrito; Juan Manuel Tovar Pedraza: definición del estudio, redacción y revisión del manuscrito.

Referencias

- Agrios, G. N. 2005. Plant pathology. Elsevier Academic Press. San Diego, CA, USA. 922 p.
- Alvarado R., D., R. L. Saavedra y S. A. Almaraz. 2008. Primer reporte de *Phytophthora cinnamomi* Rands asociado al encino (*Quercus* spp.) en Tecoaapa, Guerrero, México. *Agrociencia* 42: 565-572.
- Brasier, C. M., F. Robredo and J. F. P. Ferraz. 1993. Evidence for *Phytophthora cinnamomi* involvement in Iberian oak decline. *Plant Pathology* 42: 140-145.
- Brummer, M., M. Arend, J. Fromm, A. Schlenzig and W. F. Obwald. 2002. Ultrastructural changes and immunocytochemical localization of the elicitor quercinin in *Quercus robur* L. roots infected with *Phytophthora quercina*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 61: 109-120.
- Chavarriga, D., W. J. A. Bodles, C. Leifert, L. Belbahri and S. Woodward. 2007. *Phytophthora cinnamomi* and other fine root pathogens in north temperate pine forests. *FEMS Microbiology Letters* 276(1): 67-74.
- Erwin, D. C. and O. K. Ribeiro. 1996. *Phytophthora* Diseases Worldwide. APS Press. St. Paul, MN, USA. 562 p.
- Glazebrook, J. 2005. Contrasting mechanism of defense against biotrophic and necrotrophic pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 43: 205-227.
- Hardam, A. R. 2005. *Phytophthora cinnamomi*. *Molecular Plant Pathology* 6(6): 589-604.
- Hardy, G. E. St. J., I. J. Colquhoun and P. Nielsen 1996. The early development of disease caused by *Phytophthora cinnamomi* in *Eucalyptus marginata* and *Eucalyptus calophylla* growing in rehabilitated bauxite mined areas. *Plant Pathology* 45: 944-54.
- Horta, M., P. Caetano, C. Medeira, I. Maia and A. Cravador. 2010. Involvement of the beta-cinnamomin elicitor in infection and colonization of cork oak roots by *Phytophthora cinnamomi*. *European Journal of Plant Pathology* 127: 427-436.
- Leyva M., S. G., E. Cárdenas S., J. M. Tovar P., J. Huerta E. y H. E. Villaseñor M. 2012. Estimación histopatológica del grado de infección inducido por *Stagonospora nodorum* en plántulas de trigo. *Agronomía* 20(1): 7-16.
- Malajczuk, N. 1979. Biological suppression of *Phytophthora cinnamomi* in eucalyptus and avocado in Australia. In: Schippers, B. and W. Gams (eds). *Soil plant pathogens*. Academic Press. New York, NY, USA. pp. 635-652.
- Moralejo, E., M. J. García and E. Descals. 2009. Susceptibility of Iberian trees to *Phytophthora ramorum* and *P. cinnamomi*. *Plant Pathology* 58: 271-283.
- Obwald, W., F. Fleischmann, D. Rigling, J. Diez, A. C. Coelho, A. Cravador, R. J. Dalio, M. Horta, H. Pfanz, C. Robin, G. Sipos, A. Solla, T. Cech, A. Chambery, S. Diamandis, E. Hansen, T. Jung, L. B. Orlikowski, J. Parke, S. Prospero and S. Werres. 2014. Strategies of attack and defense in woody plant-*Phytophthora* interactions. *Forest Pathology* 44: 169-190.
- Oh, E. and E. M. Hansen. 2007. Histopathology of infection and colonization of susceptible and resistant Port-Orford-Cedar by *Phytophthora lateralis*. *Phytopathology* 97(6): 684-693.
- O'Gara, E., J. A. McComb, I. C. Colquhoun and G. E. St. J. Hardy. 1997. The infection of non-wounded and wounded periderm tissue at the lower stem of *Eucalyptus marginata* by zoospores of *Phytophthora cinnamomi*, in a rehabilitated bauxite mine. *Australasian Plant Pathology* 26: 135-141.

Contribution by author

Santos Gerardo Leyva Mir: definition of the study, data collection and writing of the manuscript; Nancy Patricia Nava García and Betsabé Diego Martínez: pathogenicity test and histopathological analysis; Alejandra Almaraz Sánchez: histopathological analysis; Silvia Mariel Hernández Villalobos: pathogenicity test and review of the manuscript; Juan Manuel Tovar Pedraza: definition of the study, writing and review of the manuscript.

End of the English version



- Portz, R. L., F. Fleischmann, J. Koehl, J. Fromm, D. Ernst, S. F. Pascholati and W. F. Osswald. 2011. Histological, physiological and molecular investigations of *Fagus sylvatica* seedlings infected with *Phytophthora citricola*. *Forest Pathology* 41: 202-211.
- Robin, C., M. L. Desprez L. and C. Delatour. 1992. Spatial and temporal enlargement of cankers of *P. cinnamomi* in red oak. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 362-366.
- Ruiz G., F. J., R. M. Navarro C., R. Sánchez C. and A. Pérez de L. 2015. Histopathology of infection and colonization of *Quercus ilex* fine roots by *Phytophthora cinnamomi*. *Plant Pathology* 64:605-616.
- Tainter, F. H., J. G. O'Brien, A. Hernández and F. Orozco. 2000. *Phytophthora cinnamomi* as a cause of oak mortality in the state of Colima, Mexico. *Plant Disease* 84(4): 394-398.
- Téliz O., D. y A. Mora A. 2007. El aguacate y su manejo integrado. Ediciones Mundi-Prensa. México, D.F., México. 321 p.
- Tovar P., J. M., J. A. Mora A., C. Nava D., G. Valdovinos P., D. Téliz O., A. Villegas M. and J. Hernández M. 2012. Identification, pathogenicity and histopathology of *Lasiodiplodia theobromae* on sapote mamey grafts in Guerrero, Mexico. *Agrociencia* 46(2): 147-161.
- Zentmyer, A. G. 1980. *Phytophthora cinnamomi* and the diseases it causes. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, USA. 96 p.







Artículo / Article

Evaluación de las propiedades físicas de material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Physical properties of materials made of bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Karen Catherine Lázaro León¹, Héctor E. Gonzáles Mora²,
Aldo J. Cárdenas Oscanoa³ y Javier Gago Campusano⁴

Resumen

En años recientes, se ha incrementado el uso de los compuestos termoplásticos reforzados con materiales lignocelulósicos, debido a la creciente necesidad de las industrias de la construcción y automotriz. Esta conducta es impulsada por varios factores de mercado y de la sociedad, como la demanda por productos amigables con el medio ambiente, la regulación estricta del uso de los químicos, cambios en el estilo de vida. Las fibras y harina de madera se usan comúnmente en los materiales compuestos, pero se pueden sustituir con otras naturales como el lino, sisal, palma, fique, yute, coco, bambú; la mayoría de ellos son desechos agro-industriales. Se utilizaron partículas provenientes de la parte apical de cañas residuales de bambú (*Guadua angustifolia*) para la obtención de materiales compuestos de polipropileno (PP) reforzados, sin y con agente acoplante (anhídrido maléico de polipropileno-MAPP). La elaboración se hizo con el método de extrusión y moldeo por compresión, con tamaños de malla ASTM: -20/+40, -40/+60 y -60/+80; proporciones de mezcla bambú/plástico: 50/50, 40/60 y 30/70; y con 0 y 2 % de MAPP. En total se obtuvieron 18 formulaciones. Se evaluaron las siguientes propiedades físicas: contenido de humedad, densidad, absorción e hinchamiento. Los resultados muestran que los materiales presentaron los mejores valores con el tamaño de malla -60/+80, con la proporción de mezcla 30/70 y cuando contenían MAPP en su composición.

Palabras clave: Bambú, *Guadua angustifolia* Kunth, materiales compuestos, método de extrusión, polipropileno, propiedades físicas.

Abstract

Today there is a growing demand of thermoplastic composites reinforced with lignocellulosic materials in the construction and automotive industries; this growth is driven by various factors, including the need of utilizing environment friendly products, the strict regulation of the use of chemicals, and lifestyle changes. Wood fibers and flour are used in the composite materials and can be replaced with flax, sisal, palm, fique, jute, coconut, and bamboo agro-industrial waste. Particles from the apical part of residual bamboo (*Guadua angustifolia*) canes were used to obtain reinforced polypropylene (PP) composites, with or without a coupling agent (maleic anhydride-propylene, MAPP). The composites were made with the extrusion compression molding process, using -20/+40, -40/+60 and -60/+80 ASTM meshes; 50/50, 40/60 and 30/70 bamboo/plastic mixing ratios, and 0 and 2 % MAPP. A total of 18 formulations were obtained. The following physical properties were assessed: moisture content, density, absorption and swelling. The results show that the materials attained the best values with the -60/+80 mesh and the 30/70 mixing ratio when they contained MAPP. It can be concluded that composites can be made using bamboo particles, propylene and a coupling agent.

Key words: Bamboo, *Guadua angustifolia* Kunth, composite materials, extrusion method, polypropylene, physical properties.

Fecha de recepción/ Reception date: 2 de julio de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 28 de octubre de 2016

¹ Bachiller en Ciencias Forestales. Perú. Correo-e: kphiru@hotmail.com

² Dpto. Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú.

³ Laboratorio de Anatomía de la Madera y Propiedades Físicas. Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera. CITEMADERA. Perú.

⁴ Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Perú.

Introducción

En años recientes, los compuestos termoplásticos reforzados con materiales lignocelulósicos han aumentado, debido a la creciente necesidad de las industrias de la construcción y automotriz. Este crecimiento es impulsado por varios factores de mercado y de la sociedad, como la demanda por productos amigables con el medio ambiente, la regulación estricta del uso de los químicos, cambios en el estilo de vida y su creciente aceptación en el sector constructivo (Crespell y Vidal, 2008).

Las fibras y harina de madera se usan comúnmente en los materiales compuestos, pero se pueden sustituir con otras fibras naturales como el lino, sisal, palma, fique, yute, coco, bambú (Clemons *et al.*, 2013). La mayoría de ellos son desechos agro-industriales con alto contenido de lignina y celulosa; por lo que constituyen un material atractivo por su abundancia, bajo costo y buenas propiedades mecánicas (Cuéllar y Muñoz, 2009). Las fibras de bambú destacan por su rápido crecimiento y se consideran un sustituto para diferentes usos de la madera (Abdul *et al.*, 2012).

En el Perú, sobresale *Guadua angustifolia* Kunth, la cual se utiliza en construcción de viviendas, cobertizos, galpones, almacenes, casas de campo, etcétera; sin embargo, la actividad de aprovechamiento del bambú en el país suele generar muchos residuos (González, 2005).

Los polímeros son materiales habituales de amplio uso en la sociedad; principalmente, en el sector de envases, fundas, envolturas, construcción y automotriz, lo que a su vez genera desechos en cantidades importantes. Se estima que solo se recicla 13 % de los productos plásticos debido al costo de recuperación, así como la identificación del mismo (Brien, 2013); el resto no recuperado, termina acabando en la intemperie, en botaderos o en rellenos sanitarios, los que están cada vez más saturados.

La unión de la fibra vegetal y cualquier polímero da origen a un material compuesto, cuyas propiedades físicas son importantes, porque permiten definir el uso final del producto de acuerdo a los resultados que presenten en relación a la densidad y absorción (Faruk *et al.*, 2012). Uno de los mayores problemas que presentan los materiales compuestos con cantidades grandes de partícula en su composición es la absorción de agua (Bahari y Krause, 2016; Venkateshwaran *et al.*, 2012). Asimismo, agregar MAPP ayuda a que haya una menor absorción, lo que mejora las propiedades de los materiales compuestos (Bhandari *et al.*, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la combinación de los diferentes tamaños de mallas, proporciones de mezcla bambú/plástico, y adición de MAPP en el contenido de humedad, densidad, absorción e hinchamiento, a fin de recomendar la o las formulaciones que aseguren un mejor desempeño del material compuesto.

Introduction

The use of thermoplastic composites reinforced with lignocellulosic materials has increased in recent years as a result of the growing need of the construction and automotive industries. This growth is driven by various market- and society-related factors, such as the demand for environment friendly products, the strict regulation of the use of chemicals, lifestyle changes, and a growing acceptance in the construction sector (Crespell and Vidal, 2008).

Wood fibers and flour are commonly used in composite materials, but they can be replaced with other natural fibers such as flax, sisal, palm, fique, jute, coconut or bamboo (Clemons *et al.*, 2013). Most of these materials are agro-industrial waste with a high content of lignine and cellulose; therefore, they attractive due to their abundance, low cost and good mechanical properties (Cuéllar and Muñoz, 2009). Bamboo fibers stand out for their rapid growth and, in various instances, can replace wood (Abdul *et al.*, 2012).

Guadua angustifolia Kunth is prevalent in Peru, where it is utilized in the construction of houses, sheds, barns, storehouses, country houses, etc. However, the exploitation of bamboo nationwide usually leaves many residues (González, 2005).

Polymers are habitual materials widely used by society, particularly in the packing, cases, wrappings, construction and automotive sectors, whereby a considerable amount of waste is generated. According to estimates, only 13 % of the plastic products are recycled due to the high cost of its recovery process and its identification (Brien, 2013); the unrecovered remainder ends up out in the open, in garbage dumps or sanitary landfills, which are increasingly saturated.

The union of the vegetal fiber and any polymer gives rise to a composite material whose physical properties are important as they allow defining the final use of the product according to their results in relation to density and absorption (Faruk *et al.*, 2012). One of the main issues of composite materials with large amounts of particles in their composition is water absorption (Bahari and Krause, 2016; Venkateshwaran *et al.*, 2012). Furthermore, adding MAPP helps to reduce the absorption levels, and therefore to improve their properties (Bhandari *et al.*, 2012).

The objective of the present study was to assess the impact of the combination of the various mesh sizes, bamboo/plastic mixing ratios and addition of MAPP on the moisture content, density, absorption and swelling, in order to recommend the formulation or formulations that may ensure a better performance of the composite material.

Materiales y Métodos

Las partes apicales de la caña de *Guadua angustifolia* se recolectaron en Caserío Limoncito, distrito La Florida, Cajamarca, Perú. Se dejaron orear, se secaron en horno MOORE, molieron y tamizaron, para obtener tres tamaños de partícula como material de refuerzo (malla ASTM 20, 40, 60 y 80).

Como matriz termoplástica se utilizó un homopolímero de polipropileno, con un índice de fluidez de 12.5 g 10 min⁻¹ (2.16 kg 230 °C⁻¹). El agente acoplante fue el anhídrido maléico de polipropileno (MAPP), a una concentración de 2 %.

Se secaron las partículas en estufa LABOR MÜSZE RIPARI a 100 °C por 48 h para reducir el contenido de humedad. Se elaboraron diferentes mezclas (Cuadro 1). La extrusión de materiales se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) usando una máquina extrusora de 1 husillo, a una temperatura entre 175-185 °C y 30 rpm, después el material extraído se molió para su posterior prensado.

Materials and Methods

The apical parts of the *Guadua angustifolia* cane were collected in the village of *Limoncito*, in the district of *La Florida*, *Cajamarca*, Peru. They were left to air out, dried in a MOORE oven, and ground and sifted in order to obtain three particle sizes as reinforcement materials (20, 40, 60 and 80 ASTM mesh).

A polypropylene homopolymer with a fluidity index of 12.5 g 10 min⁻¹ (2.16 kg 230 °C⁻¹) was used as a thermoplastic matrix. The coupling agent was maleic anhydride propylene (MAPP), at a 2 % concentration.

The particles were dried in a LABOR MÜSZE RIPARI oven during 48 hours at 100 °C in order to reduce moisture content. Various mixtures were prepared (Table 1). The materials were extruded at the laboratory of the *Instituto Peruano de Energía Nuclear*, IPEN (Peruvian Institute of Nuclear Energy) using a single screw extruder machine at a temperature of 175-185 °C and 30 rpm; the extracted material was ground for subsequent pressing.

Cuadro 1. Mezclas obtenidas con diferentes tamaños partícula, polipropileno y agente acoplante.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Intervalo tamaño de partícula (µm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2



Table 1. Mixtures obtained with different-sized particles, polypropylene and coupling agent.

Formulation	ASTM mesh size	Particle size interval (μm)	Composition		
			Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2

Los materiales compuestos se formaron en una prensa hidráulica con moldes de 21 x 21 cm, a una velocidad de 0.9 cm s⁻¹ y una presión de 40 bares; el curado del material se hizo durante 4 min a una temperatura entre 177 - 195 °C. Estos fueron cortados con láser, a una velocidad de 0.78 mm min⁻¹ y una potencia de 45 w, para obtener las probetas; las dimensiones y el acondicionamiento se realizaron tomando como referencia las normas: ASTM D1037-99 (ASTM, 1999) para contenido de humedad y densidad, y ASTM D570-98 (ASTM, 2010) para los ensayos de absorción e hinchamiento.

La preparación de la materia prima, el secado de las muestras y los ensayos se efectuaron en los laboratorios de Transformación Química y de Secado de la madera, del departamento de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

El modelo estadístico del diseño factorial fue el siguiente:

$$A_i = A_0 + K_0T + K_1P + K_2C + (K_3)TP + (K_4)TC + (K_5)PC + (K_6)TPC + \epsilon TPC$$

The composite materials were formed in a hydraulic press with 21 x 21 cm molds at a speed of 0.9 cm s⁻¹ and a pressure of 40 bars. The materials were treated during 4 min at a temperature of 177 to 195 °C, and were then cut with laser at a speed of 0.78 mm min⁻¹ and a potency of 45 w in order to obtain the test specimens; the dimensions and conditioning of the latter were based on the norms ASTM D1037-99 (ASTM, 1999) for moisture content and density, and ASTM D570-98 (ASTM, 2010) for absorption and swelling trials.

The raw materials were prepared, the samples were dried and the tests were carried out at the Wood Chemical Transformation and Drying laboratories of the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (La Molina National Agrarian University) in Lima, Peru.

The following statistic model was used for the factorial design:

$$A_i = A_0 + K_0T + K_1P + K_2C + (K_3)TP + (K_4)TC + (K_5)PC + (K_6)TPC + \epsilon TPC$$

Donde:

- $A0$ = Media general
- $K0T, K1P$ y $K2C$ = Efecto del nivel i -ésimo tratamiento respectivamente
- $(K3)TP, (K4)TC$ y $(K5)PC$ = Efectos de interacción doble respectivamente
- $(K6)TPC$ = Efecto de interacción triple en la combinación
- $\epsilon TPCl$ = Efecto del error aleatorio en la combinación
- T = Tamaño de malla ASTM (-20/+40, -40/+60, -60/+80)
- P = Proporción de mezcla bambú/plástico (50/50, 40/60, 30/70)
- C = Concentración de agente acoplante (0, 2)
- l = Número de repeticiones

Se aplicó un análisis de varianza con el programa *Statistical Analysis System* versión 9.2 (SAS, 2008). Cuando se observaron diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) se hizo la prueba de comparación de medias de Tukey.

Resultados y Discusiones

Contenido de humedad

En la Figura 1 y en el Cuadro 2, se resumen la variación de los valores promedios de humedad final de todas las muestras de material compuesto con polipropileno. La variación de humedad se muestra directamente proporcional con la cantidad de partículas; las mezclas 50/50 y sin agente acoplante obtuvieron los mayores valores; los menores correspondieron a las probetas con agente acoplante y tamaños de malla -20/+40 y -40/+60. Lo anterior indica que el agente acoplante actúa mejor con esos tamaños. Es importante remarcar que la humedad inicial de todas las partículas, antes del procesamiento, no fue superior a 2 %.

Where:

- $A0$ = Overall mean
- $K0T, K1P$ and $K2C$ = Effect of the i^{th} level treatment, respectively
- $(K3)TP, (K4)TC$ and $(K5)PC$ = Effects of double interaction, respectively
- $(K6)TPC$ = Effect of triple interaction on the combination
- $\epsilon TPCl$ = Effect of the random error on the combination
- $T = (-20/+40, -40/+60, -60/+80)$ ASTM mesh size
- $P =$ Bamboo/plastic mixing ratio (50/50, 40/60, 30/70)
- $C =$ Coupling agent concentration (0, 2)
- $l =$ Number of repetitions

A variance analysis was applied using the *Statistical Analysis System* software (SAS, 2008). Whenever differences between treatments ($p < 0.05$) were observed, Tukey's mean test was performed.

Results and Discussion

Moisture content

Figure 1 and Table 2 summarize the variation of the mean final moisture values of all the samples of composite material containing polypropylene. Variation in moisture appears as directly proportional to the amount of particles; the 50/50 mixtures and those without a coupling agent had the highest values, while the lowest were for the test specimens with coupling agent and for -20/+40 and -40/+60 mesh sizes. This shows that the coupling agent works best with these two sizes. It should be emphasized that the initial moisture of all the particles, before processing, was not above 2 %.

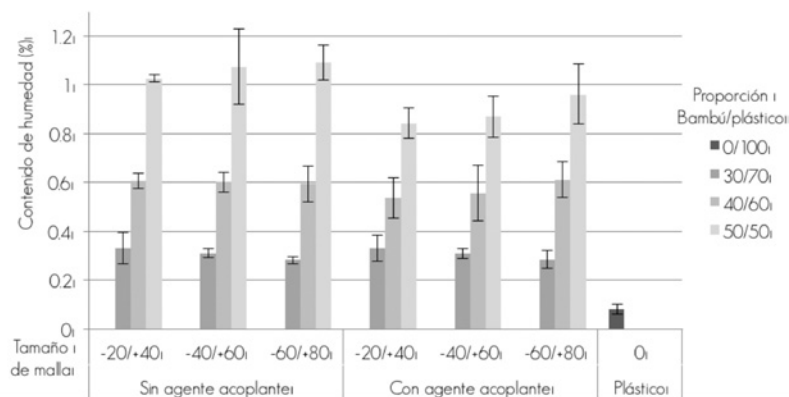


Figura 1. Contenido de humedad de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.

Figure 1. Moisture content of the bamboo/plastic composite materials made.

Cuadro 2. Media, desviación estándar y variancia de los valores obtenidos para las propiedades físicas evaluadas.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Composición			Contenido de humedad (%)			Densidad (g cm ⁻³)			Absorción (%)			Hinchamiento (%)		
		Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia
F ₁	-20/+40	50	50	0	1.0 [0.06]	0.0034	0.88 [0.05]	0.0024	28 [4.47]	19.9580	5 [0.78]	0.6000				
F ₂	-20/+40	40	60	0	0.6 [0.08]	0.0070	0.87 [0.02]	0.0006	30 [4.20]	17.6962	4 [0.52]	0.2656				
F ₃	-20/+40	30	70	0	0.3 [0.05]	0.0025	0.83 [0.03]	0.0009	17 [2.75]	7.5579	3 [0.72]	0.5256				
F ₄	-40/+60	50	50	0	1.1 [0.08]	0.0061	0.89 [0.03]	0.0008	29 [3.40]	11.4923	6 [0.67]	0.4531				
F ₅	-40/+60	40	60	0	0.6 [0.11]	0.0112	0.88 [0.06]	0.0036	16 [2.39]	5.7308	4 [0.61]	0.3739				
F ₆	-40/+60	30	70	0	0.3 [0.02]	0.0004	0.87 [0.06]	0.0042	14 [2.55]	6.5015	3 [0.29]	0.0855				
F ₇	-60/+80	50	50	0	1.1 [0.12]	0.0133	0.86 [0.05]	0.0020	25 [3.07]	9.4345	5 [0.23]	0.4810				
F ₈	-60/+80	40	60	0	0.6 [0.07]	0.0056	0.87 [0.06]	0.0030	15 [2.56]	6.5371	4 [0.39]	0.1585				
F ₉	-60/+80	30	70	0	0.3 [0.04]	0.0013	0.95 [0.01]	0.0002	10 [1.55]	2.4171	3 [0.36]	0.1806				
F ₁₀	-20/+40	50	48	2	0.8 [0.02]	0.0002	0.86 [0.07]	0.0049	21 [1.08]	1.1611	5 [0.22]	0.0472				
F ₁₁	-20/+40	40	58	2	0.5 [0.03]	0.0009	0.83 [0.05]	0.0025	23 [4.19]	17.5332	4 [0.39]	0.1558				
F ₁₂	-20/+40	30	68	2	0.3 [0.06]	0.0036	0.89 [0.03]	0.0009	15 [1.58]	2.4880	2 [0.49]	0.2453				
F ₁₃	-40/+60	50	48	2	0.9 [0.16]	0.0242	0.89 [0.06]	0.0042	24 [2.72]	7.3880	4 [0.39]	0.1571				
F ₁₄	-40/+60	40	58	2	0.6 [0.04]	0.0014	0.86 [0.05]	0.0030	19 [2.79]	7.7760	4 [0.52]	0.2759				
F ₁₅	-40/+60	30	68	2	0.3 [0.02]	0.0003	0.87 [0.03]	0.0008	14 [2.10]	4.4319	2 [0.41]	0.1702				
F ₁₆	-60/+80	50	48	2	1.0 [0.07]	0.0044	0.89 [0.04]	0.0019	20 [1.89]	3.5609	5 [0.76]	0.5836				
F ₁₇	-60/+80	40	58	2	0.6 [0.07]	0.0047	0.93 [0.04]	0.0018	15 [1.74]	3.0438	3 [0.38]	0.1463				
F ₁₈	-60/+80	30	68	2	0.3 [0.01]	0.0002	0.90 [0.04]	0.0015	14 [2.12]	4.4978	2 [0.46]	0.2125				

Table 2. Mean, standard deviation and variance of the values obtained for the assessed physical properties.

Formulation	ASTM mesh size	Composition			Moisture content (%)			Density (g cm ⁻³)			Absorption (%)			Swelling (%)		
		Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance
F ₁	-20/+40	50	50	0	1.0 [0.06]	0.0034	0.88 [0.05]	0.0024	28 [4.47]	19.9580	5 [0.78]	0.6100				
F ₂	-20/+40	40	60	0	0.6 [0.08]	0.0070	0.87 [0.02]	0.0006	30 [4.20]	17.6962	4 [0.52]	0.2656				
F ₃	-20/+40	30	70	0	0.3 [0.05]	0.0025	0.83 [0.03]	0.0009	17 [2.75]	7.5579	3 [0.72]	0.5256				
F ₄	-40/+60	50	50	0	1.1 [0.08]	0.0061	0.89 [0.03]	0.0008	29 [3.40]	11.4923	6 [0.67]	0.4531				
F ₅	-40/+60	40	60	0	0.6 [0.11]	0.0112	0.88 [0.06]	0.0036	16 [2.39]	5.7308	4 [0.61]	0.3739				
F ₆	-40/+60	30	70	0	0.3 [0.02]	0.0004	0.87 [0.06]	0.0042	14 [2.55]	6.5015	3 [0.29]	0.0855				
F ₇	-60/+80	50	50	0	1.1 [0.12]	0.0133	0.86 [0.05]	0.0020	25 [3.07]	9.4345	5 [0.23]	0.4810				
F ₈	-60/+80	40	60	0	0.6 [0.07]	0.0056	0.87 [0.06]	0.0030	15 [2.56]	6.5371	4 [0.39]	0.1585				
F ₉	-60/+80	30	70	0	0.3 [0.04]	0.0018	0.95 [0.01]	0.0002	10 [1.55]	2.4171	3 [0.36]	0.1306				
F ₁₀	-20/+40	50	48	2	0.8 [0.02]	0.0002	0.86 [0.07]	0.0049	21 [1.08]	1.1611	5 [0.22]	0.0472				
F ₁₁	-20/+40	40	58	2	0.5 [0.03]	0.0009	0.83 [0.05]	0.0025	23 [4.19]	17.5332	4 [0.39]	0.1558				
F ₁₂	-20/+40	30	68	2	0.3 [0.06]	0.0036	0.89 [0.03]	0.0009	15 [1.58]	2.4880	2 [0.49]	0.2453				
F ₁₃	-40/+60	50	48	2	0.9 [0.16]	0.0242	0.89 [0.06]	0.0042	24 [2.72]	7.3880	4 [0.39]	0.1571				
F ₁₄	-40/+60	40	58	2	0.6 [0.04]	0.0014	0.86 [0.05]	0.0030	19 [2.79]	7.7760	4 [0.52]	0.2759				
F ₁₅	-40/+60	30	68	2	0.3 [0.02]	0.0003	0.87 [0.03]	0.0008	14 [2.10]	4.4319	2 [0.41]	0.1702				
F ₁₆	-60/+80	50	48	2	1.0 [0.07]	0.0044	0.89 [0.04]	0.0019	20 [1.89]	3.5609	5 [0.76]	0.5836				
F ₁₇	-60/+80	40	58	2	0.6 [0.07]	0.0047	0.93 [0.04]	0.0018	15 [1.74]	3.0438	3 [0.38]	0.1463				
F ₁₈	-60/+80	30	68	2	0.3 [0.01]	0.0002	0.90 [0.04]	0.0015	14 [2.12]	4.4978	2 [0.46]	0.2125				

Cárdenas (2012) señala que una humedad menor a 2 por ciento en el material compuesto es aceptable para evitar problemas en la formación de los mismos; en una investigación realizada por el autor, registra valores de humedad para materiales compuestos entre 0.27 y 0.31 % elaborados por moldeo por inyección. Moya *et al.* (2012) citan valores superiores de humedad con materiales compuestos, entre 3 y 7 %, señalan que puede haber efecto de la naturaleza higroscópica debido a la presencia de grupos hidroxilo y a la baja calidad de encapsulamiento de las partículas, por parte del polímero durante su fabricación. Asimismo, Martínez-López *et al.* (2014) obtuvieron un valor de 4 % para compuestos elaborados por extrusión. En las probetas evaluadas, la humedad de todas las formulaciones está dentro del intervalo indicado por Cárdenas (2012).

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con las proporciones de mezcla y la concentración de agente acoplante ($p < 0.0001$). El análisis, también indicó que no hay diferencias significativas con respecto al tamaño de malla ($p = 0.2302$).

Densidad

La variación de los valores promedio y su desviación estándar se muestra en la Figura 2, además, en el Cuadro 2 se presenta la variancia. Se observa un incremento en la densidad en la mayoría de las combinaciones, al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.84 g cm^{-3}), la proporción 30/70, sin agente acoplante y con la partícula más pequeña (malla -60/+80) registró la densidad más alta: 0.95 g cm^{-3} . Por el contrario, con la partícula más grande (malla -20/+40), para la misma proporción 30/70, sin agente acoplante, se obtuvo la menor densidad 0.83 g cm^{-3} .

According to Cárdenas (2012), a moisture content below 2 % in composite materials is acceptable to avoid problems in their formation. Research carried out by this author registered moisture values of 0.27 to 0.31 % for the composite materials made by injection molding. Moya *et al.* (2012) cite higher moisture values--of 3 and 7 %--for composite materials; they point out that the hygroscopic nature may have an effect due to the presence of hydroxyl groups and to the low quality of the particle encapsulation by the polymer during the manufacture. Furthermore, Martínez-López *et al.* (2014) obtained a value of 4 % for composites produced by extrusion. In the assessed test specimens, the moisture content of all formulations is within the interval registered by Cárdenas (2012).

The statistical analysis evidenced significant differences ($p < 0.0001$) in the mixing ratios and coupling agent concentrations. The analysis also showed the absence of significant differences ($p = 0.2302$) in relation to mesh size.

Density

Figure 2 shows the variation of means and their standard deviation; likewise, Table 2 shows the variance. An increase in the density of most combinations can be observed to occur with the increase of the number of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.84 g cm^{-3}), the mixing ratio was 30/70; no coupling agent was used, and the smallest particle (-60/+80 mesh) had the highest density (0.95 g cm^{-3}). Conversely, the mixture with the largest mesh size (-20/+40) for the same 30/70 ratio without a coupling agent had the lowest density (0.83 g cm^{-3}).

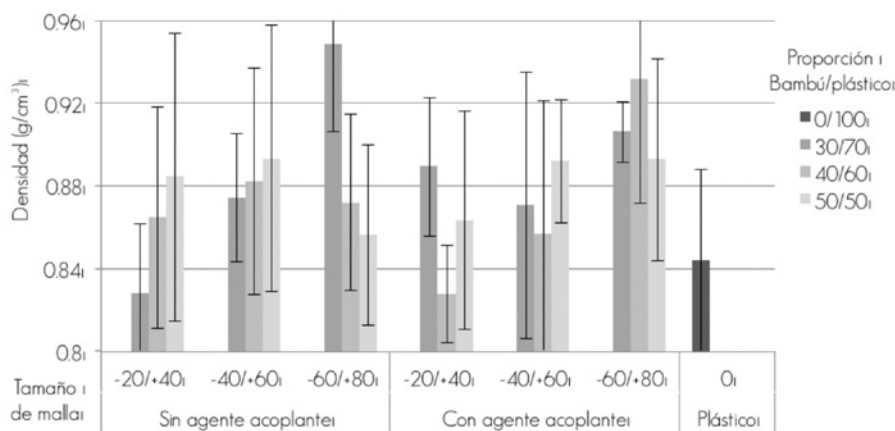


Figura 2. Densidad de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.
Figure 2. Density of the bamboo/plastic composite materials.

Moya *et al.* (2012) consignan que la densidad es directamente proporcional al contenido de partículas, y que al ser adicionadas para la formación de los materiales compuestos, se supera el valor de densidad del plástico. Clemons *et al.* (2013) enfatizan la importancia de tener en cuenta la densidad, debido a que hay aplicaciones en las que el peso es importante, lo cual es de interés para la industria automotriz y empaque.

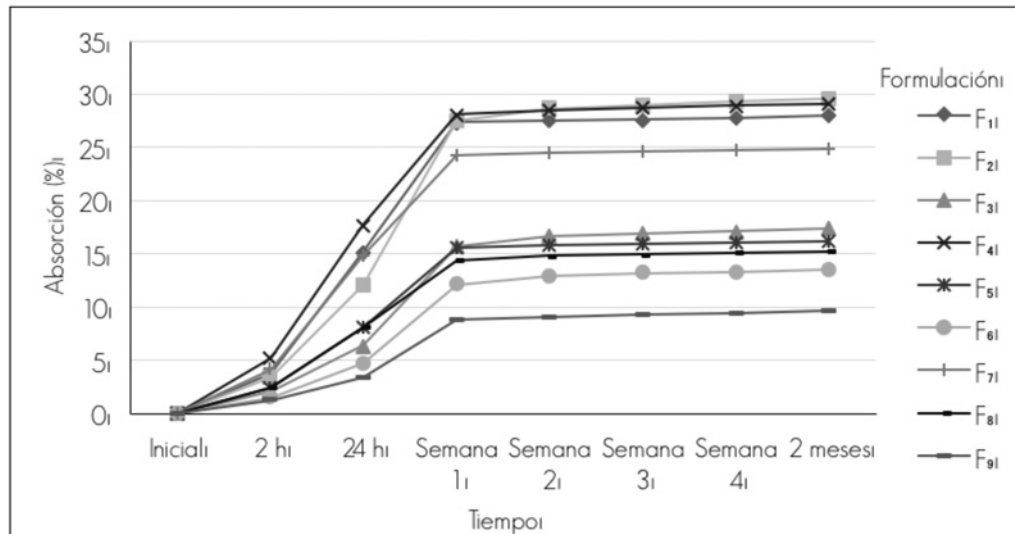
En una investigación realizada por Moya *et al.* (2012), obtuvieron en una mezcla con 40 por ciento de partículas, una densidad de 1.05 g cm^{-3} , valor superior al valor del plástico 0.94 g cm^{-3} . Cárdenas (2012) documenta cifras entre 1.06 a 1.1 g cm^{-3} , en materiales compuestos con 50 por ciento de partículas, supera el del plástico 0.9 g cm^{-3} . En las probetas evaluadas el mayor valor fue de 0.95 g cm^{-3} , que difiere de lo indicado por Moya *et al.* (2012). Al respecto, Rosa *et al.* (2009) mencionan que la baja densidad de los compuestos se puede deber a que la matriz no ha embebido completamente a las partículas; Upadhyaya *et al.* (2012) indican que los bajos valores responden a la formación de los espacios vacíos en los materiales compuestos.

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con respecto al tamaño de malla ($p = 0.0009$) y su interacción con la proporción de mezcla ($p=0.0431$) y concentración de agente acoplante ($p = 0.0337$).

According to Moya *et al.* (2012), density is directly proportional to the particle content, and when these are added to form the composite materials, a higher density than that of plastic is attained. Clemons *et al.* (2013) emphasize the importance of taking density into account because there are applications for which weight is important; these are of interest for the automotive and packing industry.

A research carried out by Moya *et al.* (2012) documents a mixture with 40% particles, a density of 1.05 g cm^{-3} , a value above that of plastic (0.94 g cm^{-3}). For composite materials made with 50 percent of particles, Cárdenas (2012) quotes figures ranging between 1.06 and 1.1 g cm^{-3} , representing a higher density than that of plastic (0.9 g cm^{-3}). In the assessed test specimens, the highest value was 0.95 g cm^{-3} ; this differs from the value registered by Moya *et al.* (2012). In this regard, according to Rosa *et al.* (2009), the low density of the composites may be due to the fact that the matrix has not totally saturated the particles; Upadhyaya *et al.* (2012) point out that the low values are due to the formation of void spaces in the composite materials.

The statistical analysis evidenced that there are significant differences ($p = 0.0009$) in mesh sizes and in their interaction with the mixing ratio ($p = 0.0431$) and the coupling agent concentrations ($p = 0.0337$).



F₁, F₂ y F₃ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₄, F₅ y F₆ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₇, F₈ y F₉ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁, F₂ and F₃ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₄, F₅ and F₆ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₇, F₈ and F₉ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 3. Evolución de la absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados sin agente acoplante.

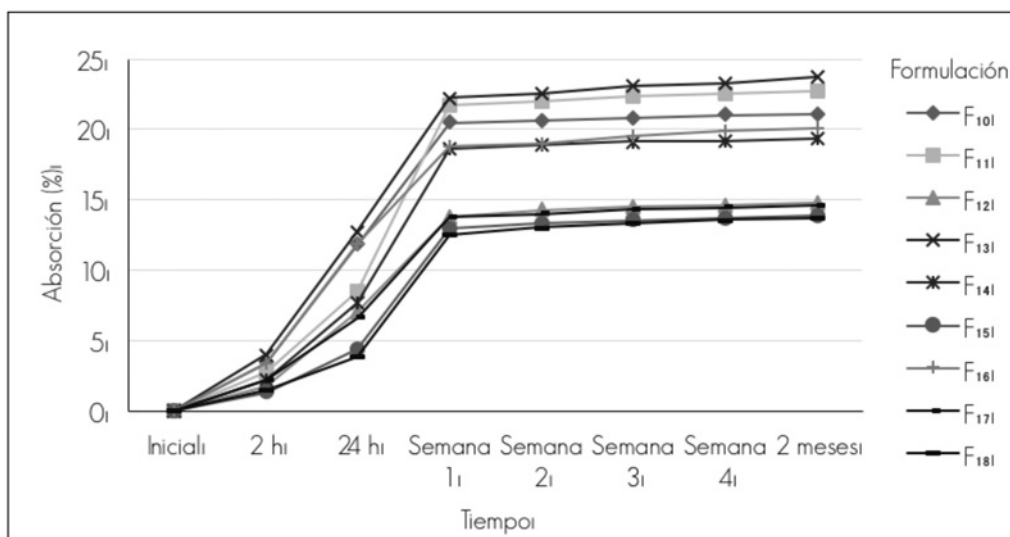
Figure 3. Evolution of the absorption of bamboo/plastic composite materials made without a coupling agent.

Absorción

En la Figura 3 se exhibe la absorción para los materiales compuestos sin agente acoplante y en la Figura 4, la absorción para los compuestos con agente acoplante durante 2 meses de inmersión en agua. Cada marcador representa el valor promedio de las probetas. En las figuras se observa, inicialmente, una variación en la absorción de manera lineal mientras se incrementa el tiempo de inmersión.

Absorption

Figure 3 shows the absorption for the composite materials without a coupling agent, and Figure 4 shows the absorption of composites with coupling agent during 2 months of immersion in water. Each marker represents the average value of the test specimens. Initially, the figures show a linear variation in the absorption as the immersion time increases.



F_{10i}, F_{11i} y F_{12i} = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F_{13i}, F_{14i} y F_{15i} = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F_{16i}, F_{17i} y F_{18i} = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F_{10i}, F_{11i} and F_{12i} = Composite materials with a -20/+40 mesh sizes and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F_{13i}, F_{14i} and F_{15i} = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively. F_{16i}, F_{17i} and F_{18i} = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figure 4. Evolution of the absorption of bamboo/plastic composite materials made with a coupling agent.
 Figura 4. Evolución de la absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados con agente acoplante.

En la Figura 5 se presenta, la variación de los valores promedio de absorción y su desviación estándar con 2 meses de inmersión; asimismo en el Cuadro 2 se muestra la variancia. La absorción es directamente proporcional con la cantidad de partículas, pero menos notoria con el tamaño de malla. La proporción de mezcla 40/60, sin agente acoplante con tamaño de malla -20/+40 fue la que registró el mayor valor de absorción, 30 %. Además, se observa que el agente acoplante tiene un efecto favorable, ya que reduce la absorción de agua, y alcanza un valor de 24 % con la proporción 50/50 con tamaño de malla -40/+60, pero con la proporción 30/70, tamaño de malla -60/+80, fue de 14 %.

Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012), Lisperguer *et al.* (2013) y Bahari y Krause (2016) indican que la absorción de agua es uno de los principales problemas que tienen los materiales compuestos que contienen mayor cantidad de partículas en su composición. Al respecto, Takatani *et al.* (2008)

Figure 5 shows the variation of the mean absorption values and their standard deviation with an immersion period of 2 months; likewise, Table 2 shows the variance. Absorption is directly proportional to the number of particles; however, its relation to mesh size is less obvious. The 40/60 mixing ratio with a -20/+40 mesh size and without a coupling agent had the highest value for absorption (30 %). Besides, the coupling agent has a favorable effect, as it reduces water absorption and reaches a value of 24 % with the 50/50 ratio and a -40/+60 mesh size; however, with the 30/70 ratio and the -60/+80 mesh size, the absorption rate was 14 %.

Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012), Lisperguer *et al.* (2013) and Bahari and Krause (2016) indicate that water absorption is one of the main problems of composite materials containing a larger number of particles in their composition. In this respect, Takatani *et al.* (2008) state that absorption must not reach a value above 10 %; the values registered for the assessed test

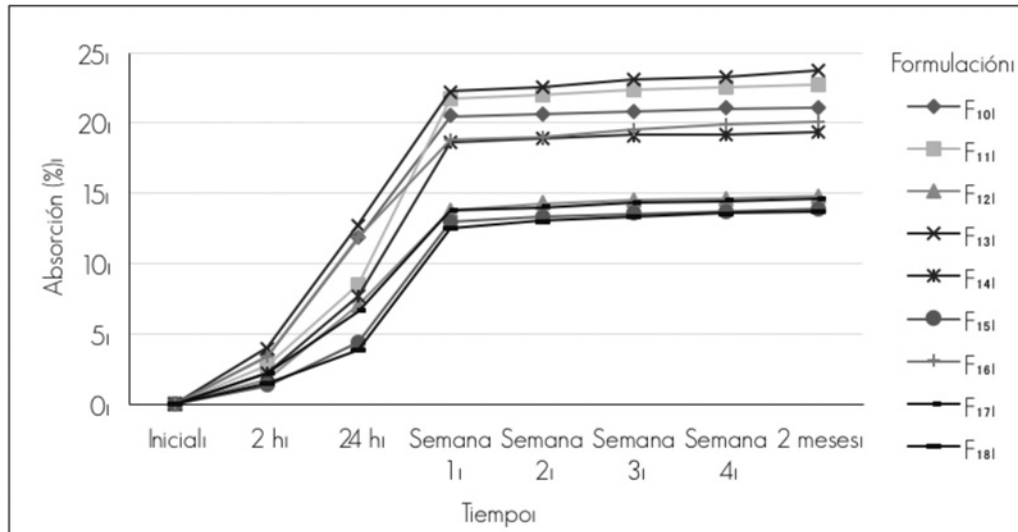


Figura 5. Absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados, sumergidos a los 2 meses en agua.

Figure 5. Absorption of the bamboo/plastic composite materials submerged in water for two months.

señalan que la absorción no debe superar el valor de 10 %, los registros en las probetas evaluadas superan la absorción mínima indicada por el autor; estos resultados se explican por la inadecuada mezcla de los materiales, que provoca la formación de espacios vacíos producidos entre las partículas y la matriz (Moya *et al.*, 2012), con ello se intensifica la penetración del agua en la fibra (Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011); además, la presencia de los grupos hidroxilos en las fibras influyen en la capacidad de absorber humedad (Idrus *et al.*, 2012; Bahari and Krause, 2016).

Con respecto al efecto del agente acoplante, Reddy *et al.* (2010) citan que este contribuye a incrementar la unión interfacial entre la parte hidrofílica de la fibra y la parte hidrofóbica del polipropileno, lo cual reduce la naturaleza hidrofílica del compuesto; Lisperguer *et al.* (2013) indican que el incremento de la adhesión interfacial con la presencia de MAPP no es determinante para la absorción. Como se observa en la Figura 5, los materiales compuestos con agente acoplante presentan una disminución en la absorción, sin embargo, los valores son superiores a lo señalado por Takatani *et al.* (2008), esto se puede deber a lo indicado anteriormente.

El análisis estadístico indica que hay diferencias significativas en todas sus variables ($p < 0.0001$).

En la Figura 6 se muestran los espacios vacíos en los materiales compuestos, debido, probablemente, a la baja calidad de encapsulamiento de las partículas por parte de la matriz.

specimens exceed the minimum absorption indicated by the author; these results are due to the inadequate mixture of the materials, which causes the formation of void spaces between the particles and the matrix (Moya *et al.*, 2012); this intensifies the penetration of water in the fibers (Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011). In addition, the presence of hydroxyl groups in the fibers impacts their ability to absorb moisture (Idrus *et al.*, 2012; Bahari and Krause, 2016).

As for the effect of the coupling agent, Reddy *et al.* (2010) note that it contributes to increase the interfacial union between the hydrophilic part of the fiber and the hydrophobic part of polypropylene, which reduces the hydrophilic nature of the composite. Lisperguer *et al.* (2013) state that the increase in the interfacial adherence occurring with the presence of MAPP does not determine the absorption. As it may be observed in Figure 5, composite materials with coupling agent have reduced absorption. However, the values are above those cited by Takatani *et al.* (2008); this may be due to the above cause.

The statistical analysis indicates that there are significant differences ($p < 0.0001$) in all its variables.

Figure 6 shows the void spaces in the composite materials probably because of the low quality of the encapsulation of the particles by the matrix.



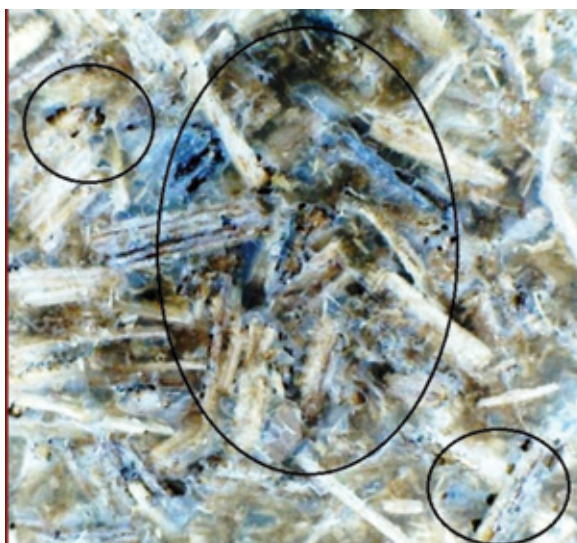


Figura 6. Imágenes de espacios vacíos (ubicados dentro de los círculos) en la superficie del material compuesto bambú/plástico obtenido con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50.

Figure 6. Images of void spaces (circled) in the surface of the bamboo/plastic composite obtained with a -20/+40 mesh size and a 50/50 mixing ratio.

En la Figura 7 se observa la coloración del agua después de 2 meses de sumergidas las probetas; esta se debe, probablemente, a la existencia de extractivos cromógenos los que, además, pueden haber interferido en la compatibilidad entre las fibras con la matriz de polipropileno.

Figure 7 shows the coloring of water after the test specimens were submerged for 2 months; this may be due to the presence of chromogenic extractives that may also have interfered with the compatibility between the fibers and the polypropylene matrix.

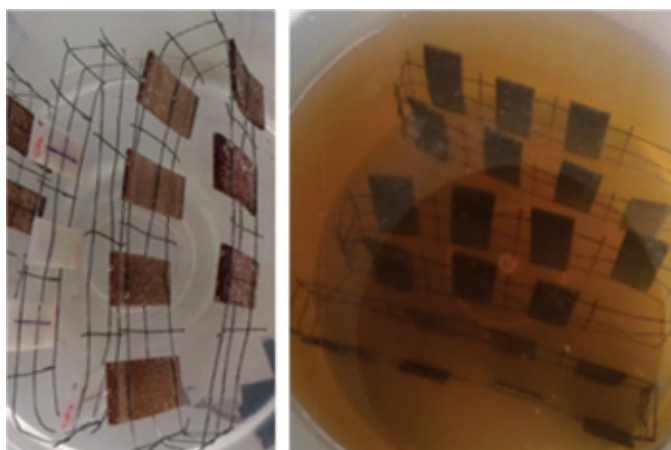


Figura 7. Coloración del agua antes (izquierda) y después de 2 meses (derecha) de sumergidos los materiales compuestos bambú/plástico.

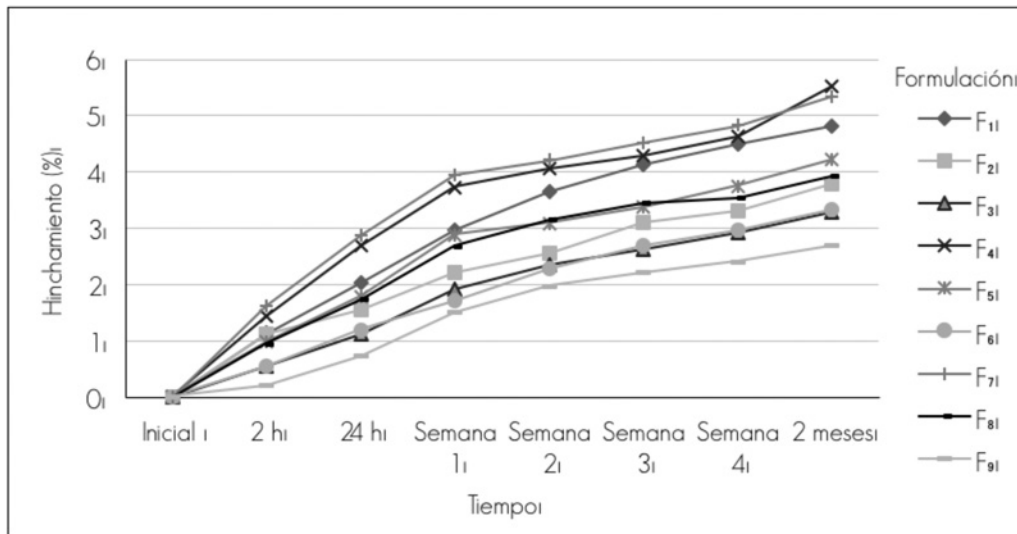
Figure 7. Coloring of the water before (left) and after (right) the materials were submerged for two months.

Hinchamiento

En la Figura 8, se muestra el hinchamiento para los materiales compuestos sin aditivo, y en la Figura 9, el hinchamiento para los compuestos con aditivo durante 2 meses de inmersión en agua, cada marcador representa el valor promedio de las probetas. En el primer mes se obtuvo el aumento de espesor más grande.

Swelling

Figure 8 shows the swelling of the composite without an additive, and Figure 9, the swelling for the composite material with additive after 2 months of immersion in water; each marker represents the mean value of the test specimens. The largest increase in thickness occurred during the first month.



F₁, F₂ y F₃ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₄, F₅ y F₆ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₇, F₈ y F₉ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁, F₂ and F₃ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₄, F₅ and F₆ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₇, F₈ and F₉ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 8. Evolución del hinchamiento de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados sin aditivo.

Figure 8. Evolution of the swelling of bamboo/plastic composite materials made without an additive.

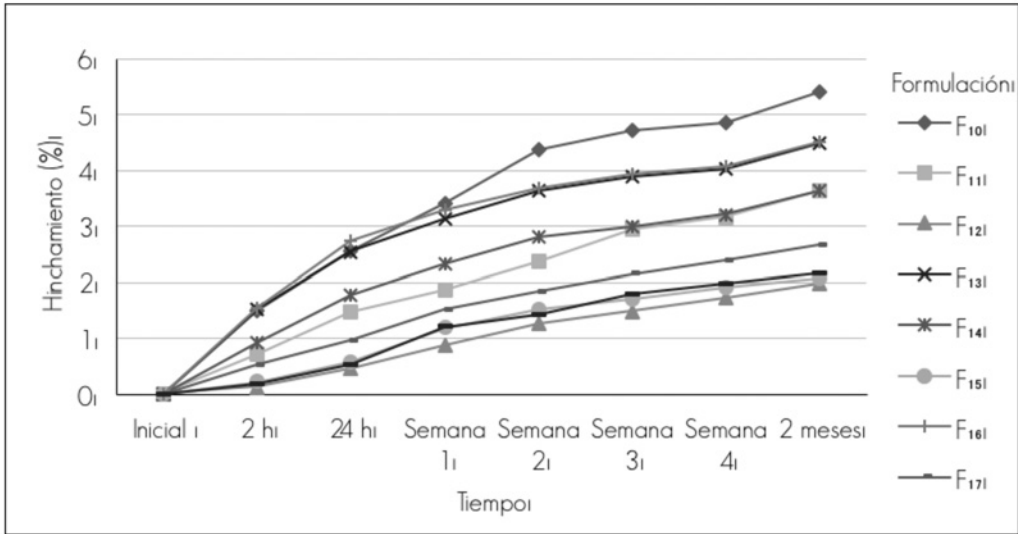
En la Figura 10, se presenta la variación de los valores promedio de hinchamiento y su desviación estándar con 2 meses de inmersión; así mismo, en el Cuadro 2, la variancia. Se observa que el hinchamiento tiene una variación directa con la proporción de mezcla, al igual que la absorción. Cuando se emplea menor proporción de partículas de bambú en la mezcla, el hinchamiento es menor; esta variación no es tan notoria con el tamaño de partículas. En la Figura 10 la proporción de mezcla 50/50, sin agente acoplante con tamaño de malla -40/+60 fue la que tuvo el mayor valor de hinchamiento, 6 %.

Con respecto a la presencia de agente acoplante, su uso favorece la reducción del hinchamiento en la mayoría de las formulaciones; la proporción de mezcla 50/50, con tamaño de malla -20/+40 obtuvo un valor superior a 5 %, pero con la proporción 30/70, y el mismo tamaño de malla, fue de 2 %.

The variation of the mean swelling values and their standard deviation after 2 months of immersion are shown in Figure 10, and the variance is shown in Table 2. Swelling, as well as absorption, has a direct variation in relation to the mixing ratio. A lower proportion of bamboo particles in the mixture results in less swelling; the relationship between this variation and particle size is not so obvious. The 50/50 mixing ratio without a coupling agent and with a -40/+60 mesh size had the highest value for swelling (6 %) (Figure 10).

The use of a coupling agent favors the reduction of the swelling in most formulations; the 50/50 ratio with a -20/+40 mesh size registered a value of over 5 %; however, with the 30/70 ratio and the same mesh size, the value for swelling was a mere 2 %.

According to Rowell (2006), Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012) and Lisperguer *et al.* (2013), swelling is directly proportional to the percentage of particles in the composite



F₁₀, F₁₁ y F₁₂ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₃, F₁₄ y F₁₅ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₆, F₁₇ y F₁₈ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁₀, F₁₁ and F₁₂ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₁₃, F₁₄ and F₁₅ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₁₆, F₁₇ and F₁₈ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 9. Evolución del hinchamiento de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados con aditivo.
 Figure 9. Evolution of the swelling of bamboo/plastic composite materials made with an additive.

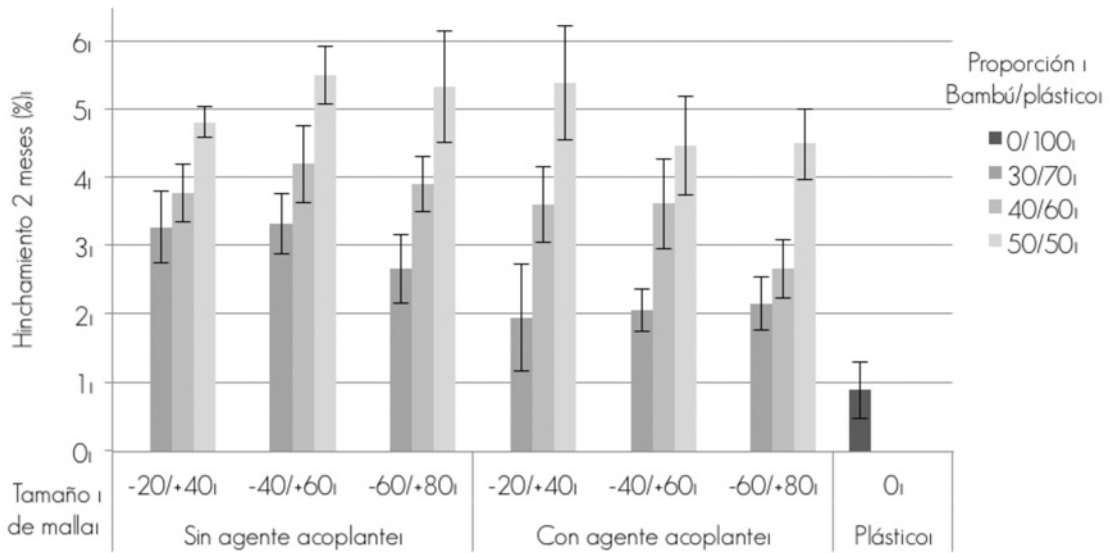


Figura 10. Absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados, sumergidos a los 2 meses en agua.
 Figure 10. Absorption of the bamboo/plastic composite materials submerged in water during two months.

Según Rowell (2006), Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012) y Lisperguer *et al.* (2013), el hinchamiento es directamente proporcional con el porcentaje de partículas en el material compuesto; Takatani *et al.* (2008) señalan que no debe superar el valor de 12 %. En un estudio de Lisperguer *et al.* (2013), se obtuvieron valores de hinchamiento que variaron de 8 y 10 %; Martínez-López *et al.* (2014) y Moya *et al.* (2012) documentan resultados de 0.06 a 0.3 %, por el método de extrusión; mientras que Cárdenas (2012) registra valores cercanos a 8 % para compuestos con 50 % de partículas. Los porcentajes en las probetas evaluadas fueron de 2 a 6 %, que coinciden con el valor citado por Takatani *et al.* (2008) y Lisperguer *et al.* (2013).

En la Figura 10 se observa que los registros en las probetas con agente acoplante son menores; sin embargo, Lisperguer *et al.* (2013) indican que el incremento de la adhesión interfacial con la presencia de MAPP no afecta el hinchamiento.

El análisis estadístico mostró que hay diferencias significativas en todas sus variables ($p < 0.0001$).

Conclusiones

Se puede elaborar compuestos con base en partículas de bambú, polipropileno y agente acoplante.

Los materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80, 30 por ciento de contenido de partícula de bambú, con agente acoplante tienen valores más altos para las propiedades físicas evaluadas. Los materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40, 50 por ciento de contenido de partícula de bambú y sin agente acoplante presentaron los menores valores.

El incremento de partículas de bambú en el material compuesto origina un incremento en las propiedades de humedad, densidad, absorción e hinchamiento.

Los materiales compuestos con agente acoplante presentan menores valores de contenido de humedad, absorción e hinchamiento, lo cual evidencia un posible efecto inhibitorio en la absorción de humedad.

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ, por apoyar y financiar parte de la investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014; a la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente a la Facultad Ciencias Forestales. Al Ing. Carlos Rojas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

material; Takatani *et al.* (2008) point out that it should not exceed the value of 12 %. In a study by Lisperguer *et al.* (2013), swelling values ranging between 8 and 10 % were obtained; Martínez-López *et al.* (2014) and Moya *et al.* (2012) register values of 0.06 to 0.3 %, using the extrusion method, while Cárdenas (2012) registers values of approximately 8 % for composites with 50 % particles. The percentages in the assessed test specimens were 2 to 6 %; these values agree with those cited by Takatani *et al.* (2008) and Lisperguer *et al.* (2013).

Figure 10 shows lower values for test specimens with a coupling agent; however, according to Lisperguer *et al.* (2013), the increase in interfacial adherence with the presence of MAPP does not affect the swelling.

The statistical analysis showed significant differences ($p < 0.0001$) for all its variables.

Conclusions

Composites can be made from bamboo particles, polypropylene and a coupling agent.

The highest values for the assessed physical properties were for composite materials with a -60/+80 mesh size, a content of bamboo particles of 30 % and a coupling agent. Composites made with a -20/+40 mesh, a bamboo particle content of 50 % and no coupling agent had the lowest values.

Larger numbers of bamboo particles in the composite resulted in increased moisture, density, absorption and swelling.

The composites made with a coupling agent had lower values for moisture content, absorption and swelling; this evidences a potential inhibiting effect in the absorption of moisture.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the *Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad*, INNOVATE PERÚ for its support and for funding part of the research under project 414-PNICP-PIAP-2014; to the *Universidad Nacional Agraria La Molina*--particularly to its Faculty of Forestry--and to Carlos Rojas, Eng.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Karen Catherine Lázaro León: raw material processing, assessment of properties, data analysis and writing of the paper; Héctor E. González Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa and Javier Gago Campusano: review of the manuscript.

End of the English version

Contribución por autor

Karen Catherine Lázaro León: procesamiento de la materia prima, evaluación de las propiedades y análisis de datos, redacción del escrito; Héctor E. González Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa, Javier Gago Campusano: revisión del manuscrito.



Referencias

- Abdul, K., H. P. S., I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan and Y. S. Hadi. 2012. Bamboo fiber reinforced biocomposites: A review. *Materials and Design*. 42: 353-368.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1999. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood Base Fiber and Particle Panels Materials ASTM D 1037 - 99. West Conshohocken, PA, USA. 32 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2010. Standard Test Method for Water Absorption of Plastic. ASTM D 570 - 98 (2010) e. West Conshohocken, PA, USA. 32 p.
- Bahari, S. and A. Krause. 2016. Utilizing Malaysian bamboo for use in thermoplastic composites. *Journal of Cleaner Production* 110: 16-24.
- Bhandari, N., S. Thomas, Ch. Das and R. Adhikari. 2012. Analysis of morphological and mechanical behaviours of bamboo flour reinforced polypropylene composites. *Nepal Journal of Science and Technology* 13 (1): 95 - 100.
- Brien, M. 2013. The plastic industry: economic overview. In: *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Second edition. Elsevier Ltd. Oxford, United Kingdom. pp. 31- 131.
- Cárdenas, A. 2012. Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino. Tesis Mg. Sc. Productos Forestales. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal, México. 145 p.
- Clemons, C., R. Rowell, D. Plackett and B. Segerholm. 2013. Wood/nonwood thermoplastic composites. In: Rowell, Roger, ed. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Second edition. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. pp. 473 - 508.
- Crespell, P. and M. Vidal. 2008. Market and Technology Trends and Challenges for Wood Plastic Composites. In: *North America. Proceedings of the 51 st International Convention of Society of Wood Science and Technology*. 15 de enero de 2015. Concepción, Chile. 4 p.
- Cuéllar, A. y I. Muñoz. 2009. Fibra de Guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Revista Dyna* 77(162): 137 - 142.
- Faruk, O., A. K. Bledzki, H. P. Fink and M. Sain. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science* 37:1552 - 1596.
- González, H. 2005. Elaboración de una propuesta para la elaboración y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca - Oxapampa). Informe Final. Lima, Perú. 95 p.
- Idrus, M. S., Hamdan, M. Rahman and M. Islam. 2011. Treated Tropical Wood Sawdust-Polypropylene Polymer Composite: Mechanical and Morphological Study. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 2: 435 - 444.
- Lisperguer, J., X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar y H. Venegas. 2013. Efecto de las Características de Harina de Madera en las Propiedades físico-mecánicas y térmicas de Polipropileno Reciclado. *Revista Maderas. Ciencia y tecnología* 15(3): 321 - 336.
- Martínez-López, Y., R. R. Fernández-Concepción, D. A. Álvarez-Lazo, M. García-González y E. Martínez-Rodríguez. 2014. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 20 (3): 227 - 236.
- Moya, C., H. Poblete y L. Valenzuela. 2012. Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza de madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1): 13 - 29.
- Rosa, S., E. Santos, C. Ferreira y S. Nachtigall. 2009. Studies on the Properties of Rice-Hulk-Filled-PP Composites- Effect of Maleated PP. *Materials Research* 12 (3): 333 - 338.
- Reddy, C., A. Sardashi y L. Simon. 2010. Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites. *Composites Science and Technology* 70: 1674 - 1680.
- Rowell, R. 2006. Advances and Challenges of Wood Polymer Composites. In: *Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*. 15 de enero de 2015. Kuala Lumpur, Malasia. pp. 2- 11.
- Statistical Analysis System (SAS). 2008. The SAS System for Windows version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Takatani, M., A. Ishikawa, K. Sakamoto, K. Ikeda and T. Okamoto. 2008. The properties of Bamboo Flour-Plastic Composites with High Filler Content Formulations. *Journal of The Adhesion Society of Japan* 44(6): 214 - 219.
- Venkateshwaran, N., A. Elayaperumal and G. Sathiya. 2012. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. *Composites Part B: Engineering* 43(2): 793 - 796.
- Upadhyaya, P., M. Garg, V. Kumar and A. Nema. 2012. The effect of water absorption on mechanical properties of Wood flour/wheat husk polypropylene hybrid composites. *Materials Sciences and Applications* 3: 317 - 325.





Artículo / Article

Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Mechanical properties of the composite material made with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Karen Catherine Lázaro León¹, Héctor E. Gonzáles Mora² y Aldo J. Cárdenas Oscanoa³

Resumen

Los materiales compuestos se usan desde la antigüedad. A partir de 1939 se emplearon las fibras naturales como refuerzo de una matriz plástica, ya que ofrecen ciertas ventajas en comparación con las sintéticas, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas, no causan irritación en los ojos, y presentan una menor demanda energética para su producción. Se utilizaron partículas provenientes de la parte apical de cañas residuales de bambú (*Guadua angustifolia*) para la obtención de materiales compuestos de polipropileno (PP) reforzados, sin y con agente acoplante (anhídrido maléico de polipropileno-MAPP). En la elaboración se elaboraron materiales compuestos por el método de extrusión y compresión con tamaños de malla ASTM: -20/+40, -40/+60 y -60/+80; con proporciones de mezcla bambú/plástico: 50/50, 40/60 y 30/70; y con 0 y 2 % de MAPP. En total se obtuvieron 18 formulaciones, a las cuales se les evaluaron sus propiedades mecánicas de tensión, flexión e impacto. Los resultados muestran que los materiales presentaron los mejores valores con el tamaño de malla -60/+80 y la proporción 30/70 para la tensión, flexión e impacto, y que el MAPP mejora las propiedades de los materiales compuestos con bambú.

Palabras clave: Bambú, flexión, impacto, materiales compuestos, polipropileno, tensión.

Abstract

Composite materials have been utilized since ancient times. Natural fibers have been used as reinforcement for plastic matrices since 1939, because they offer certain advantages compared to synthetic fibers: they are renewable, biodegradable, less abrasive, do not cause eye irritation, and their production involves less energy demand. Particles from the apical parts of residual bamboo (*Guadua angustifolia*) canes were used in this study to obtain composite polypropylene (PP) materials, with or without a coupling agent (maleic anhydride-polypropylene, MAPP). These materials were made using the extrusion/compression method, with -20/+40, -40/+60 and -60/+80 ASTM mesh sizes; 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, and 0 and 2 % MAPP. A total of 18 formulations were obtained, and their mechanical properties of tension, flexion and impact were assessed. The results show that the materials had the best values for tension, flexion and impact with the -60/+80 mesh size and the 30/70 ratio, and that MAPP improves the properties of composite materials made with bamboo. Resistance to impact for composite materials is directly proportional when a coupling agent is added.

Key words: Bamboo, flexion, impact, composite materials, polypropylene, tension.

Fecha de recepción/ Reception date: 2 de julio de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 27 de octubre de 2016

¹ Bachiller en Ciencias Forestales. Perú. Correo-e: kphiru@hotmail.com

² Facultad de Ciencias Forestales, Dpto. Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. Correo-e: egonzales@lamolina.edu.pe

³ Laboratorio de Anatomía de la Madera y Propiedades Físicas. Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera. CITEMADERA. Perú.

Introducción

Los materiales compuestos se usan desde la antigüedad (Pérez, 2012). A partir de 1939 se emplearon las fibras naturales como refuerzo de una matriz plástica, para el año 2000 se utilizó en diferentes partes de autos, a partir de fibras de kenaf, abacá, cáñamo y lino. Desde el 2004, se comenzaron a producir partes de artículos electrónicos como estuches de celulares y carcasas, con fibras de kenaf; y del 2006 en adelante, se fabrican artículos deportivos con fibras de cáñamo, lino y kenaf (Brief, 2011).

Las fibras naturales ofrecen ciertas ventajas en comparación con las sintéticas, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas, no causan irritación en los ojos y presentan una menor demanda energética para su producción (Mutjé *et al.*, 2006; Venkateshwaran *et al.*, 2012).

En el Perú, *Guadua angustifolia* Kunth es muy apreciado por su rápido crecimiento; se utiliza en la construcción de viviendas, cobertizos, galpones, almacenes, casas de campo, etcétera; sin embargo, su aprovechamiento genera muchos residuos, aproximadamente de una caña solo se usa 30 por ciento (González, 2005).

Al mezclarse los polímeros con rellenos lignocelulósicos no hay una adecuada adhesión, por las características hidrofóbicas e hidrofílicas de sus moléculas (Fuentes *et al.*, 2013); es por eso que se usan agentes acoplantes como el anhídrido maléico de polipropileno (MAPP) para modificar la superficie de la fibra y conseguir una buena interfase con la matriz polimérica, lo que mejora las propiedades mecánicas de los compuestos (Faruk *et al.*, 2012).

Las propiedades mecánicas son importantes para todo material compuesto, porque permiten definir un uso final del producto de acuerdo a su resistencia a la tensión, flexión e impacto (Faruk *et al.*, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la combinación de los diferentes tamaños de partículas, proporciones de mezcla bambú/plástico y adición de MAPP en las propiedades mecánicas de tensión, flexión e impacto, a fin de recomendarla o las formulaciones que aseguren un mejor desempeño.

Materiales y Métodos

Las partes apicales de la caña de *Guadua angustifolia* fueron recolectadas en el Caserío Limoncito, distrito La Florida, Cajamarca, Perú. Se dejaron secar a medio ambiente; posteriormente se colocaron se secó en horno MOORE a 60 °C hasta alcanzar un contenido de humedad de 12 por ciento, se molió y tamizó para obtener tres tamaños de

Introduction

Composite materials have been used since ancient times (Pérez, 2012). Natural fibers have been used to reinforce plastic matrices since 1939; by the year 2000, composites containing kenaf, abaca, hemp and flax fibers were integrated into various autoparts. Since 2004, certain elements for electronics, such as mobile phone cases and covers containing kenaf fibers began to be produced, and since 2006, sports items are made with hemp, flax and kenaf fibers (Brief, 2011).

Natural fibers provide certain advantages compared to synthetic fibers, as they are renewable, biodegradable, less abrasive, and do not cause eye irritation, and their production entails lower energy requirements (Mutjé *et al.*, 2006; Venkateshwaran *et al.*, 2012).

Guadua angustifolia Kunth is widely appreciated in Peru due to its rapid growth; it is used to build houses; it is used in the construction of homes, sheds, barns, storehouses, country houses, etc. However, its exploitation generates much waste, as only 30 % of the cane is used (González, 2005).

When polymers are mixed with lignocellulosic fillers, there is no adequate adhesion due to the hydrophobic and hydrophilic characteristics of their molecules (Fuentes *et al.*, 2013). Therefore, coupling agents such as maleic anhydride-polypropylene (MAPP) are used to modify the fiber surface and thus obtain a good interface with the polymeric matrix and thereby improve the mechanical properties of the composites (Faruk *et al.*, 2012).

Mechanical properties are important for all composite materials because they make it possible to determine a final use of the product according to its resistance to tension, flexion and impact (Faruk *et al.*, 2012).

The objective of the present work was to assess the effect of the combination of the various particle sizes, bamboo/plastic mixing ratios, and addition of MAPP on the mechanical properties of tension, flexion and impact, in order to recommend the formulation that will ensure the best performance.

Materials and Methods

The apical parts of the *Guadua angustifolia* cane were collected in the village of Limoncito, in the La Florida district of Cajamarca, Peru. They were left to dry in the open air and later placed in a MOORE oven at 60 °C until their moisture content decreased to 12 percent; they were subsequently ground and sifted in order to obtain three particle sizes as reinforcement material (with 20, 40, 60 and 80 ASTM mesh sizes).

A polypropylene homopolymer with a fluidity index of 12.5g 10 min⁻¹ (2.16kg 230 °C⁻¹) was used as a thermoplastic matrix.

partícula como material de refuerzo (malla ASTM 20, 40, 60 y 80).

Como matriz termoplástica se usó un homopolímero, de polipropileno, con un índice de fluidez de $12.5 \text{ g } 10 \text{ min}^{-1}$ ($2.16 \text{ kg } 230 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). El agente acoplante fue el MAPP, a una concentración de 2 %. Se secaron las partículas en estufa LABOR MÚSZE RIPARI a $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, por 48 horas para reducir el contenido de humedad; se elaboraron diferentes mezclas, las cuales se muestran en el Cuadro 1. La preparación de la materia prima, el secado de las muestras y el ensayo de flexión se llevaron a cabo en los laboratorios de productos de Transformación Química, de Secado y de Propiedades Físico-Mecánicas de la madera, del departamento de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima-Perú.

La extrusión de materiales hizo en el laboratorio del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), con una máquina extrusora de 1 husillo (elaborada en el mismo laboratorio), esta trabajó a una temperatura de $175\text{-}185 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y 30 rpm ; después, el material extruido se molió para su posterior prensado.

Los materiales compuestos se formaron en una prensa hidráulica de vulcanizado de caucho usando moldes de $21 \times 21 \text{ cm}$, a una velocidad de 0.9 cm s^{-1} y una presión de 40 bares; el curado del material se realizó durante 4 minutos, a una temperatura entre 177 y $195 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el corte se usó láser, a una velocidad de 0.78 mm min^{-1} y una potencia de 45 w, para obtener las probetas, cuyas dimensiones y normas empleadas se resumen en el Cuadro 2. Los ensayos mecánicos de tensión e impacto se llevaron a cabo en las instalaciones de una empresa colaboradora. Para las pruebas de tensión se usó una máquina para ensayos universales Zwick/Roell, con una velocidad de 5 mm min^{-1} y una celda de carga de 5 Kn; en el ensayo de impacto se empleó una máquina con una bala de 2.010 kg.

The coupling agent was MAPP, at a 2 % concentration. The particles were dried in an LABOR MÚSZE RIPARI oven at $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ during 48 hours in order to reduce their moisture content. Various mixtures, shown in Table 1 were produced. The preparation of the raw materials, the drying of the samples and the flexion trial took place at the laboratories of *Transformación Química, de Secado y de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera* (Wood Products' Chemical Transformation, Drying and Physical-Mechanical Properties), of the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (UNALM), (La Molina National Agrarian University, UNALM) in Lima, Peru.

The extrusion of materials was carried out in the laboratory of the *Peruano de Energía Nuclear*, IPEN, (Peruvian Institute of Nuclear Energy) with a single screw extruder (made in the same laboratory) operating at a temperature of $175\text{-}185 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and 30 rpm ; the extruded material was then ground and subsequently pressed.

The composite materials were formed in a hydraulic press for rubber vulcanization using $21 \times 21 \text{ cm}$ molds at a speed of 0.9 cm s^{-1} and a pressure of 40 bars; the materials were treated during 4 minutes at a temperature of 177 to $195 \text{ }^{\circ}\text{C}$. They were then cut with a laser at a speed of 0.78 mm min^{-1} and a potency of 45 w in order to obtain the test specimens, whose dimensions and norms are shown in Table 2. The mechanical tension and impact trials were carried out in the facilities of a collaborating company. The tension tests were carried out in a Zwick/Roell universal assay machine, with a speed of 5 mm min^{-1} and a 5 kN load cell, while a machine with a 2.010 kg ball was utilized for the impact trial.



Cuadro 1. Mezclas obtenidas con diferentes tamaños partícula, polipropileno y agente acoplante.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Rango tamaño de partícula (μm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0

Continúa Cuadro 1...

Continúa Cuadro 1...

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Rango tamaño de partícula (µm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2

Table]. Mixtures obtained with different particle sizes, polypropylene and a coupling agent.

Formulation	ASTM mesh size	Particle size interval (µm)	Composition		
			Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2



Cuadro 2. Dimensiones y normas ASTM usadas para la elaboración de las probetas.

Propiedad	Número total de probetas	Dimensiones de probetas			Norma ASTM
		Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	
Tensión	126	2.5 ± 0.2	165	19	D 638 - 03 ^a
Flexión	126	2.5 ± 0.2	127	12.7	D 790 - 03 ^b
Impacto	360	2.5 ± 0.2	120	65	D 5420 - 04 ^c

Fuente: ^a = ASTM, 2003a; ^b = ASTM, 2003b; ^c = ASTM, 2004.

Table 2. ASTM dimensions and norms used for making the test specimens.

Property	Total number of test specimens	Dimensions of the test specimens			ASTM Norm
		Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)	
Tension	126	2.5 ± 0.2	165	19	D 638 - 03 ^a
Flexion	126	2.5 ± 0.2	127	12.7	D 790 - 03 ^b
Impact	360	2.5 ± 0.2	120	65	D 5420 - 04 ^c

Source: ^a = ASTM, 2003a; ^b = ASTM, 2003b; ^c = ASTM, 2004.

El modelo estadístico fue un diseño completamente al azar (DCA), con arreglo factorial de 3 x 3 x 2 (tamaño de malla, proporción mezcla bambú/plástico y concentración de agente acoplante); con 7 repeticiones para los ensayos de tensión y flexión y 20 para el de impacto. El diseño fue el siguiente:

$$A_i = A_0 + KOT + K1P + K2C + (K3)TP + (K4)TC + (K5)PC + (K6)TPC + \varepsilon TPCI$$

Donde:

A₀ = Media general

KOT, K1P y K2C = Efecto del nivel i-ésimo tratamiento, respectivamente

(K3)TP, (K4)TC y (K5)PC = Representan los efectos de interacción doble, respectivamente

(K6)TPC = Efecto de interacción triple en la combinación

εTPCI = Efecto del error aleatorio en la combinación

T = Tamaño de malla ASTM (-20/+40, -40/+60, -60/+80)

P = Proporción de mezcla bambú/plástico (50/50, 40/60, 30/70)

C = Concentración de agente acoplante (0, 2)

I = Número de repeticiones

Se hizo un análisis de varianza con el programa *Statistical Analysis System* versión 9.2 (SAS, 2008). Cuando se observaron diferencias entre tratamientos (p<0.05) se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey.

The statistical model was a completely random design (CRD), with a 3 x 3 x 2 factorial arrangement (mesh size, bamboo/plastic mixing ratio and coupling agent concentration); with 7 replications for the tension and flexion trials and 20 for the impact trial. The design was as follows:

$$A_i = A_0 + KOT + K1P + K2C + (K3)TP + (K4)TC + (K5)PC + (K6)TPC + \varepsilon TPCI$$

Where:

A₀ = Overall meanKOT, K1P and K2C = Effect of the ith treatment level, respectively

(K3)TP, (K4)TC and (K5)PC = Represent the double interaction effects, respectively

(K6)TPC = Triple interaction effect on the combination

εTPCI = Effect of the random error on the combination

T = ASTM mesh size (-20/+40, -40/+60, -60/+80)

P = Bamboo/plastic mixing ratio (50/50, 40/60, 30/70)

C = Coupling agent concentration (0, 2)

I = Number of repetitions

A variance analysis was carried out with the SAS 9.2 *Statistical Analysis System* (SAS, 2008). When differences were observed between treatments (p<0.05), Tukey's mean comparison test was applied.

Resultados y Discusión

Tensión

En la Figura 1 se representa la variación de los valores promedio y la desviación estándar de la resistencia máxima a la tensión, de todas las muestras de material compuesto. Se observa que la presencia de agente acoplante favoreció la resistencia máxima. La mayor resistencia se registró con la proporción 30/70 y tamaño de malla -60/+80 de 17.8 MPa; por el contrario, la proporción 50/50, para el mismo tamaño de malla -60/+80, sin agente acoplante presentó la menor resistencia (11.9 MPa), aunque no superaron el valor del plástico (31.4 MPa).

Results and Discussion

Tension

Figure 1 shows the variation in the mean values and the standard deviation for the maximum resistance to tension of all the composite samples. The presence of the coupling agent was observed to favor maximum resistance. The highest resistance, of 17.8 MPa, was registered with the 30/70 ratio and the -60/+80 mesh size; conversely, the 50/50 ration for the same -60/+80 mesh size, without a coupling agent had the least resistance (11.9 MPa), without, however, exceeding the value for plastic (31.4 MPa).

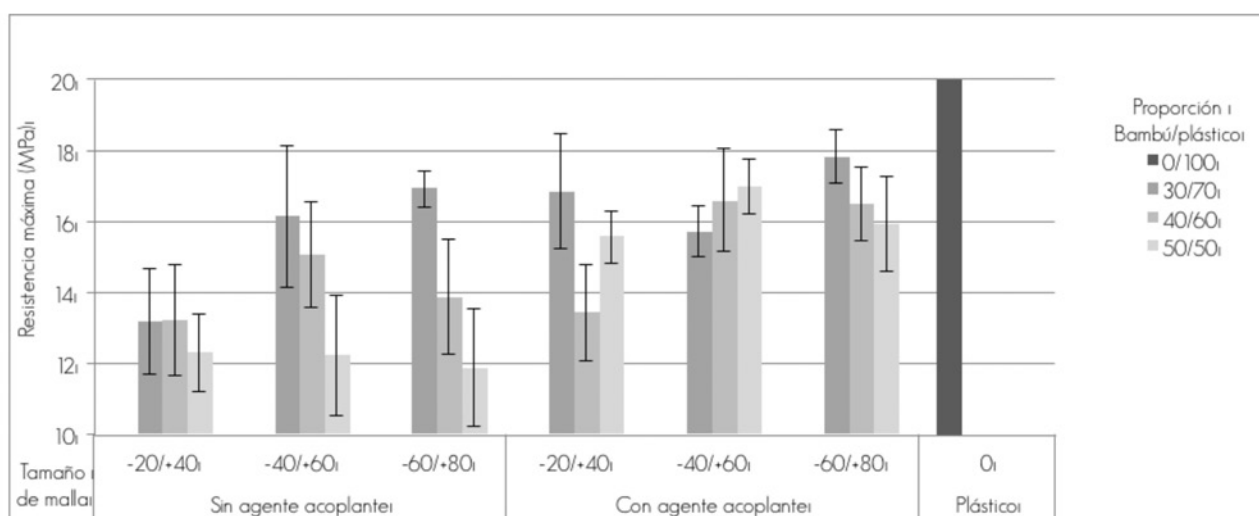


Figura 1. Resistencia máxima a la tensión de los materiales compuestos bambú/plástico.

Figure 1. Maximum resistance to tension of bamboo/plastic composite materials.

En investigaciones de Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014) y Samariha *et al.* (2015) se documentaron, para materiales compuestos con 50 por ciento de partículas, resultados entre 15 y 28.8 MPa. Moya *et al.* (2012) registraron valores de 17 a 38 MPa, para compuestos que contenían de 20 a 60 % de partículas, pero no superaron el del plástico (40 MPa). Asimismo, Idrus *et al.* (2011) citan 19 MPa para compuestos con 30 % de partículas. Además, López *et al.* (2012) obtuvieron una resistencia de 60 y 50 MPa, para compuestos con 40 y 30 % de fibras de yute, cuando se les agregó el agente acoplante. Durowaye *et al.* (2014) indican valores de 4 a 6 MPa, con 25 % de partículas de sisal.

Los resultados de las probetas evaluadas son inferiores a los señalados en la bibliografía; además ninguna formulación fue mayor al del plástico; esto se puede deber a la aglomeración de las partículas, la irregularidad de la forma del relleno; así como, a una baja interacción entre el refuerzo y la matriz, que produce una mala transferencia de esfuerzo, por lo que la

Researches by Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014) and Samariha *et al.* (2015) obtained results of 15 to 28.8 MPa for composite materials with 50 % particles. Moya *et al.* (2012) registered values of 17 to 38 MPa for composites with 20 to 60 % particles; however, these values did not exceed those of plastic (40 MPa). Likewise, Idrus *et al.* (2011) cite 19 MPa for composites with 30 % particles. Furthermore, López *et al.* (2012) obtained a resistance of 60 and 50 MPa for materials with 40 and 30 % jute fibers when the coupling agent was added. Durowaye *et al.* (2014) register values of 4 to 6 MPa with 25 % particles of sisal.

Results for the assessed test specimens are lower than those cited in the bibliography; furthermore, no formulation had values above those of plastic. This may be due to the clustering of the particles, the irregularity of the filler form, or a low interaction between the reinforcement and the matrix resulting in poor stress transfer, causing the load to act as a defect instead of a reinforcement in the matrix and therefore producing the crack

carga actuó como un defecto, y no como un refuerzo en la matriz, lo cual hizo que se produjera la grieta más rápido (Liu *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011; Cárdenas, 2012; Santos *et al.*, 2012; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.*, 2014).

Si bien, los valores son inferiores, en las formulaciones con agente acoplante hubo un incremento en los resultados, lo cual indica que las partículas formaron enlaces éster, en consecuencia el material compuesto soporta más carga (Rosa *et al.*, 2009). En la Figura 2 se presentan espacios vacíos dentro del material compuesto, tomados con un espectrómetro (USB DIGITAL MICROSCOPE (VEHO VMS 004).

more quickly (Liu *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011; Cárdenas, 2012; Santos *et al.*, 2012; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.*, 2014).

Although formulations with a coupling agent had lower values, there was an increase in the results; this indicates that the particles formed ester bonds, and therefore the composite material can bear more load (Rosa *et al.*, 2009). Figure 2 shows void spaces within the composite material, taken with a USB DIGITAL MICROSCOPE (VEHO VMS 004 spectrometer).

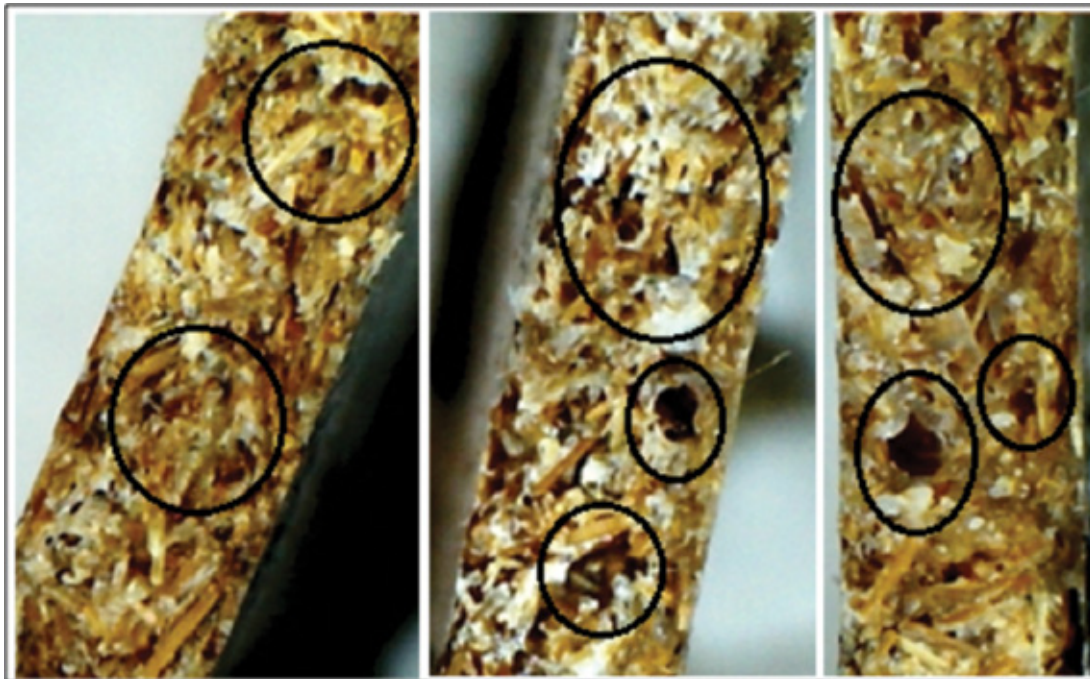


Figura 2. Imágenes de espacios vacíos (dentro de los círculos) en la sección transversal de materiales compuestos bambú/plástico obtenidos con tamaño de malla -60/+80 y proporciones 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente.

Figure 2. Images of void spaces (circled) in a cross-section of bamboo/plastic composite materials obtained with a -60/+80 mesh and 50/50, 40/60 and 30/70 ratios, respectively.

El análisis estadístico evidenció que no hay diferencias significativas en la interacción del tamaño de malla con la concentración de agente acoplante ($p = 0.5802$), pero sí en las otras variables ($p < 0.0001$). En el Cuadro 3 se consignan los valores de la comparación múltiple de medias, el cual indica que la mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 30/70 y cuando se usó MAPP.

According to the statistical analysis, there are no significant differences in the interaction between the mesh size and the coupling agent concentration ($p = 0.5802$); however, such differences were found in other variables ($p < 0.0001$). Table 3 records the values obtained from the mean comparison test, which show that the best combination was that of the -60/+80 particle size, the 30/70 ratio and the use of MAPP.



Cuadro 3. Valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para la resistencia máxima a la tensión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	14.09	B	50/50	14.14	B	0	13.86	B
-40+60	15.45	A	40/60	14.77	B	2	16.15	A
-60+80	15.48	A	30/70	16.11	A			

Table 3. Values for maximum resistance to tension obtained using Tukey's mean comparison test.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	14.09	B	50/50	14.14	B	0	13.86	B
-40+60	15.45	A	40/60	14.77	B	2	16.15	A
-60+80	15.48	A	30/70	16.11	A			

La variación de los valores promedio y la desviación estándar del módulo de elasticidad a la tensión se presentan en la Figura 3. Se observa un incremento en el MOE en la mayoría de las combinaciones al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.6 GPa). En el caso de las probetas con aditivo es evidente se observa el beneficio de agregar el agente acoplante, ya que aumentó el módulo de elasticidad de los materiales compuestos. La proporción de mezcla 50/50, con la partícula -20/+40 tuvo el MOE (1.7 GPa) más alto; por el contrario, la proporción de mezcla 40/60 para el mismo tamaño de partícula le correspondió el menor MOE (1.2 GPa).

The variation in the mean values and standard deviation of the modulus of elasticity to tension is shown in Figure 3. The MOE was observed to increase in most combinations with larger amounts of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.6 GPa). In the case of test specimens with an additive, the benefit of adding the coupling agent is evident, as it increased the modulus of elasticity of the composite material. The 50/50 mixing ratio with particle size -20/+40 attained the highest MOE (1.7 GPa); conversely, the 40/60 mixing ratio with the same particle size had the lowest value for MOE (1.2 GPa).

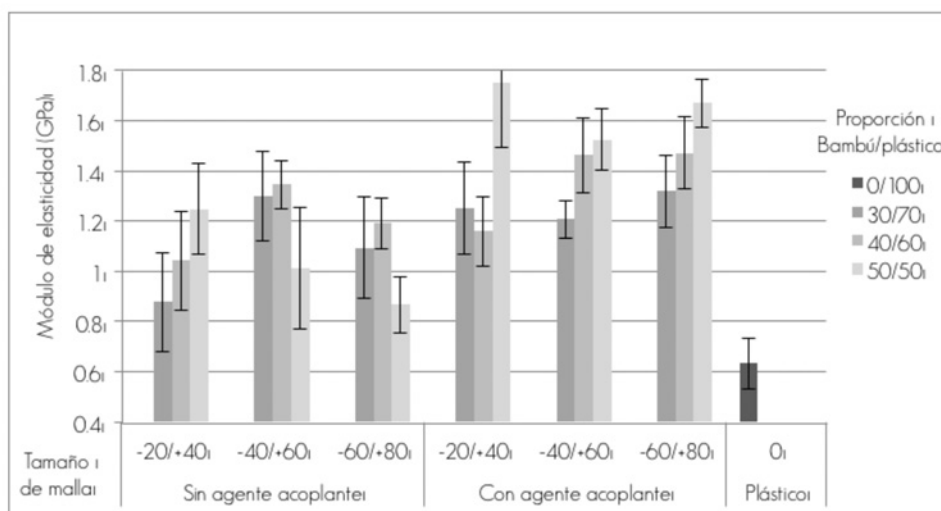


Figura 3. MOE en tensión de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.
Figure 3. MOE of bamboo/plastic composite materials in tension.

En investigaciones realizadas por Rosa et al. (2009), Idrus et al. (2011), López et al. (2012), Naghmouchi et al. (2013) y Ravi et al. (2014); se documenta que los valores del MOE son directamente proporcionales con el aumento del contenido de partículas, otros valores obtenidos por Cárdenas (2012), Lisperguer et al. (2013) y Samariha et al. (2015) varían de 0.9 a 3.6 GPa, para materiales compuestos con 50 % de partículas. Moya et al. (2012) citan de 7 a 9 GPa para compuestos con 20 a 60 % de refuerzo. Idrus et al. (2011) registraron 1.1 GPa para compuestos con 30 % de partículas; López et al. (2012) obtuvieron entre 7 y 6 GPa, con 40 y 30 % de fibras de yute.

Los registros del presente estudio superan el valor del plástico, lo cual puede deberse a que las partículas le aportan rigidez al material compuesto; es decir, actúan como refuerzo (Rosa et al., 2009; Moya et al., 2012; Naghmouchi et al., 2013; Ravi et al. 2014); sin embargo la mayoría de los resultados están por debajo de los citados en bibliografía. En las formulaciones con agente acoplante hubo un incremento en los resultados, la proporción 50/50 que tuvo el valor más alto, esto responde a que el agente acoplante pudo enlazarse con los grupos hidroxilos del refuerzo y con ello mejorar la rigidez del compuesto (Takatani et al., 2008; Rosa et al., 2009; López et al., 2012; Naghmouchi et al., 2013).

El análisis estadístico evidenció diferencias significativas en todas las variables ($p < 0.0477$). En el Cuadro 4 se exhiben la comparación múltiple de medias; se observa que la mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80 y -40/+60, la proporción 50/50 y 40/60, y MAPP.

Researches by Rosa et al. (2009), Idrus et al. (2011), López et al. (2012), Naghmouchi et al. (2013) and Ravi et al. (2014) indicate that the MOE values are directly proportional to the increase in the content of particles; other values cited by Cárdenas (2012), Lisperguer et al. (2013) and Samariha et al. (2015) vary from 0.9 to 3.6 GPa for composite materials with 50 % particles. Moya et al. (2012) documented a value of 7 to 9 GPa for composites with 20 to 60 % reinforcement. Idrus et al. (2011) registered 1.1 GPa for compounds with 30 % particles; López et al. (2012) cite values of 7 and 6 GPa with 40 and 30 % jute fibers.

The present study records higher values than those of plastic; this is because the particles provide rigidity to the composite material, i.e. they act as a reinforcement (Rosa et al., 2009; Moya et al., 2012; Naghmouchi et al., 2013; Ravi et al. 2014). However, most results are below those cited in the bibliography. In formulations using a coupling agent, there was an increase in the results; the 50/50 ratio had the highest value, as the coupling agent was able to bond with the hydroxyl groups and thereby improve the rigidity of the composite (Takatani et al., 2008; Rosa et al., 2009; López et al., 2012; Naghmouchi et al., 2013).

The statistical analysis evidenced significant differences in all the variables ($p < 0.0477$). Table 4 shows the multiple mean comparison; the best combination was observed to be the one with -60/+80 and -40/+60 particle sizes, the 50/50 and 40/60 ratios and the use of MAPP.

Cuadro 4. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para MOE en tensión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	1.22	B	50/50	1.35	A	0	1.11	B
-40+60	1.31	A	40/60	1.28	A	2	1.43	A
-60+80	1.27	AB	30/70	1.17	B			

Table 4. Multiple mean comparison using Tukey's test for MOE in tension.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	1.22	B	50/50	1.35	A	0	1.11	B
-40+60	1.31	A	40/60	1.28	A	2	1.43	A
-60+80	1.27	AB	30/70	1.17	B			

Flexión

Las mezclas sin aditivo muestran una tendencia similar en cuanto a los diferentes tamaños de partícula. En el caso de las probetas con aditivo la presencia de agente acoplante mejora la resistencia de los materiales compuestos; a la proporción de mezcla 30/70 con el tamaño de partícula -60/+80, le correspondió la mayor resistencia (22.7 MPa), por el contrario, la partícula -40/+60 y la proporción de mezcla 50/50 tuvo la menor resistencia (15 MPa); sin embargo, no superaron el valor del plástico 25.4 MPa (Figura 4).

Flexion

Mixtures without an additive show a similar tendency as to the various particle sizes. In the case of test specimens with an additive, the presence of a coupling agent improves the resistance of composite materials; the highest resistance (22.7 MPa) was reached using the 30/70 mixing ratio; conversely, the -40/+60 particle and the 50/50 mixing ratio had the lowest resistance (15 MPa). These values, however, did not surpass those of plastic (25.4 MPa) (Figure 4).

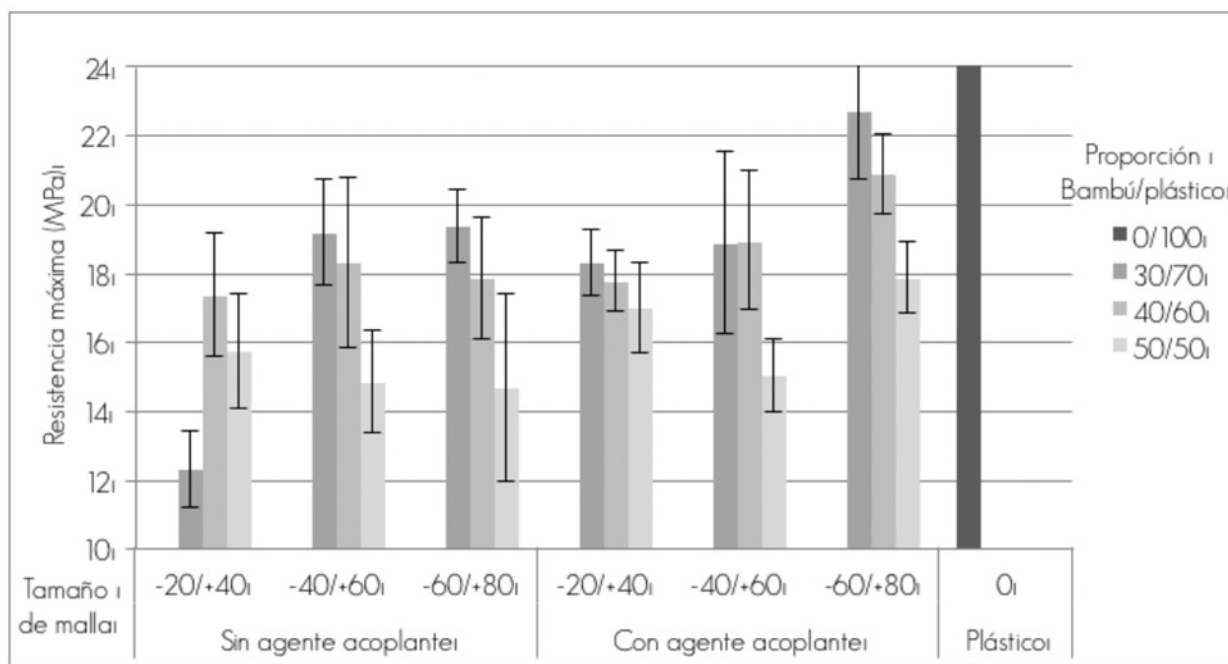


Figura 4. Resistencia máxima en flexión de los materiales compuestos bambú/plástico.
Figure 4. Maximum resistance in flexion of bamboo/plastic composite materials.

Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014), y Samariha *et al.* (2015) consignan valores de 17.5 a 60 MPa para materiales compuestos con 50 % de partículas; Bahari y Krause (2016) registran un valor de 59.6 MPa para compuestos con 25 % de partículas; Stark y Rowland (2003) documentan valores entre 38.7 a 42.6 MPa para compuestos con 40 % de partículas. Asimismo, Idrus *et al.* (2011) señalan que la resistencia se incrementa directamente con la cantidad de fibras; los resultados que se muestran en la Figura 4, no coinciden.

La mayoría de los resultados del presente estudio son inferiores a los bibliográficos, además ninguna formulación superó el valor del plástico; los anterior puede deberse a que los espacios vacíos entre la fibra y la matriz ocasionan una pobre unión interfacial, así como a la aglomeración de partículas que origina una escasa dispersión en la matriz (Ravi *et al.*, 2014), lo cual produjo una mala transferencia de esfuerzo, que, a su

Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014), and Samariha *et al.* (2015) register values of 17.5 to 60 MPa for composite materials with 50 % particles; Bahari and Krause (2016) register a value of 59.6 MPa for composites with 25 % particles; Stark and Rowland (2003) cite values of 38.7 to 42.6 MPa for composites with 40 % particles. Likewise, Idrus *et al.* (2011) point out that resistance increases in direct proportion to the number of fibers; results shown in Figure 4 do not coincide.

Most values obtained in the present study are lower than those reported in the bibliography; furthermore, no formulation surpassed the value for plastic. This may be due to the presence of void spaces between the fiber and the matrix, which result in a poor interfacial union, as well as to the clustering of particles, which leads to a scarce dispersion in the matrix (Ravi *et al.*, 2014). All of this caused a poor stress transfer, which in turn

vez, produce la falla más rápido. Al igual que en los resultados de la resistencia máxima en tensión, los materiales compuestos con agente acoplante aumentaron su resistencia, lo cual indica que las partículas formaron enlaces ésteres favoreciendo que soporten más carga (Rosa *et al.*, 2009).

No se obtuvieron diferencias significativas en la interacción de la proporción de mezcla con la concentración de agente acoplante ($p = 0.0552$) pero sí en las otras variables ($p < 0.0001$). En el Cuadro 5 se resume la información de la comparación múltiple de medias. La mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 30/70 y 40/60, y MAPP.

produced the flaw more rapidly. As in the outcome for maximum resistance in tension, the composite materials made with a coupling agent increased their resistance, which is an indication that the particles formed ester bonds that favored their ability to bear more load (Rosa *et al.*, 2009).

There were no significant differences in the interaction of the mixing ratio and the coupling agent concentration ($p = 0.0552$); however, some such differences did occur for the other variables ($p < 0.0001$). Table 5 summarizes the results of the multiple mean comparison. The best combination was obtained with the -60/+80 particle size, the 30/70 and 40/60 ratios and the use of MAPP.

Cuadro 5. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para la resistencia máxima en flexión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	16.4	C	50/50	15.85	B	0	16.60	B
-40+60	17.53	B	40/60	18.51	A	2	18.59	A
-60+80	18.89	A	30/70	18.4	A			

Table 5. Multiple mean comparison using Tukey's test for maximum resistance in flexion.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	16.4	C	50/50	15.85	B	0	16.60	B
-40+60	17.53	B	40/60	18.51	A	2	18.59	A
-60+80	18.89	A	30/70	18.4	A			

La variación de los promedios del módulo de elasticidad y la desviación estándar a la flexión se presentan en la Figura 5; se observa un aumento en el MOE para la mayoría de las combinaciones al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.6 GPa). Para las probetas con aditivo, se tiene una tendencia similar para las diferentes formulaciones; la proporción de mezcla 40/60 con la partícula -60/+80 presentó el mayor MOE (0.9 GPa), la proporción de mezcla 30/70 con la partícula -20/+40 tuvo el menor MOE (0.7 GPa).

The variations in the modulus of elasticity means and standard deviation for flexion are shown in Figure 5; an increase in the MOE is observed in most combination with an increased number of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.6 GPa). The test specimens with an additive displayed a similar tendency for the various formulations; the highest MOE (0.9 GPa) was attained using the 40/60 mixing ratio with the -60/+80 particle size, while the 30/70 mixing ratio with the -20/+40 particle size had the lowest MOE (0.7 GPa).



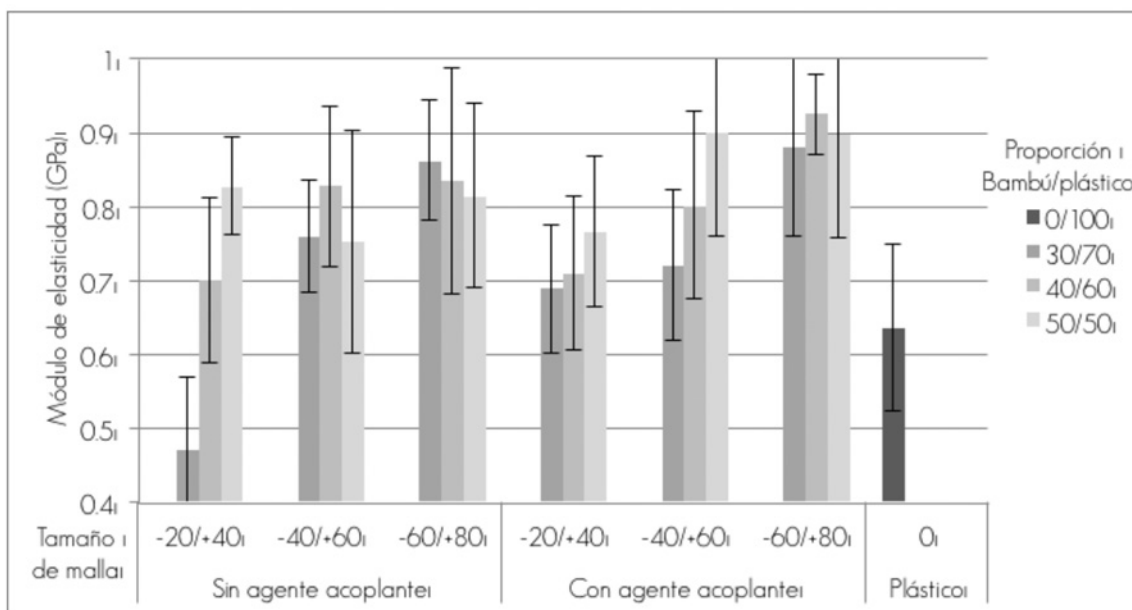


Figura 5. MOE en flexión de los materiales compuestos bambú/plástico.
Figure 5. MOE of the bamboo/plastic composite materials in flexion.

Idrus *et al.* (2011), Mattos *et al.* (2014) y Ravi *et al.* (2014) al analizar compuestos con fibras y polipropileno señalan que el MOE aumenta, de forma directa, con la cantidad de fibras. Por otro lado, Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Samariha *et al.* (2015) y, Bahari y Krause (2016) registran valores entre 0.9 a 5.2 GPa para compuestos con 50 % de partículas; Stark y Rowland (2003) y Liu *et al.* (2008) consignan 2.1 y 3.2 GPa para compuestos entre 30 a 40 % de refuerzo.

Los resultados de la presente investigación, en la mayoría de las formulaciones, superan el valor del plástico, esto se puede deber a que las partículas le otorgan rigidez al material compuesto (Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause 2016); sin embargo, están por debajo de los valores citados en la literatura, debido a la mala unión entre los materiales, lo cual crea espacios vacíos, aglomeración de partículas por la pobre dispersión en la matriz (Stark y Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause, 2016).

El análisis estadístico indicó que no hay diferencias significativas entre las dobles interacciones de concentración de agente acoplante con tamaño de malla ($p = 0.7565$) y proporción de mezcla ($p = 0.5995$). En el Cuadro 6 se muestran los valores de la comparación múltiple de medias; la mejor combinación resultó usando el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 50/50 y 40/60, y MAPP.

In their analysis of composites with fibers and polypropylene, Idrus *et al.* (2011), Mattos *et al.* (2014) and Ravi *et al.* (2014) point out that the MOE increases in direct proportion to the number of fibers. On the other hand, Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Samariha *et al.* (2015), and Bahari and Krause (2016) register values ranging between 0.9 and 5.2 GPa for composites with 50 % particles, while Stark and Rowland (2003) and Liu *et al.* (2008) report values of 2.1 to 3.2 GPa for composites with 30 to 40 % reinforcement.

The results of the present research, in most formulations, exceed the values for plastic. This is because the particles confer rigidity to the composite material (Ravi *et al.*, 2014; Bahari and Krause 2016). Nevertheless, these values are below those cited in the literature due to the poor union between the materials that produces void spaces, particle clustering as a result of poor dispersion in the matrix (Stark and Rowland, 2003; Ravi Kumar *et al.*, 2014; Bahari and Krause, 2016).

The statistical analysis indicated that there are no significant differences between the double interactions of the coupling agent concentration with the mesh size ($p = 0.7565$) and mixing ratio ($p = 0.5995$). Table 6 shows the values for the multiple mean comparison; the best combination resulted from the use of a -60/+80 particle size, 50/50 and 40/60 mixing ratios, and MAPP.



Cuadro 6. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para MOE en flexión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	0.69	C	50/50	0.82	A	0	0.76	B
-40+60	0.8	B	40/60	0.80	A	2	0.81	A
-60+80	0.86	A	30/70	0.73	B			

Table 6. Multiple mean comparison using Tukey's test for MOE in flexion.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	0.69	C	50/50	0.82	A	0	0.76	B
-40+60	0.8	B	40/60	0.80	A	2	0.81	A
-60+80	0.86	A	30/70	0.73	B			

Impacto

En la Figura 6 se representa la variación de los valores promedio y la desviación estándar del ensayo de impacto de todas las muestras de material compuesto. Se observa que no hay una tendencia marcada con respecto a la energía absorbida por el material compuesto, al parecer numéricamente todas son parecidas. Respecto a las probetas con aditivo, hay un ligero aumento en los valores de la energía absorbida por los materiales compuestos, la mezcla con el tamaño de partícula -40/+60 y la proporción 30/70 absorbió mayor energía (0.44 J), y a la mezcla con el tamaño de partícula -20/+40 y la proporción 30/70 le correspondió menor energía (0.33 J); sin embargo, no superaron el valor del plástico (2 J).

Impact

Figure 6 represents the variation in the mean values and the standard deviations of the impact trial for all the samples of composite materials. No marked tendency in regard to the energy absorbed by the composite materials is observed; they all appear to be numerically similar. As for the test specimens with an additive, there is a light increase in the values of energy absorbed by the composite materials. The mixture with a -40/+60 particle size and 30/70 mixing rate reached the highest value (0.44 J), and the lowest value (0.33 J) was for the -20/+40 particle size with the 30/70 ratio; however, the values for plastic (2 J) were higher.

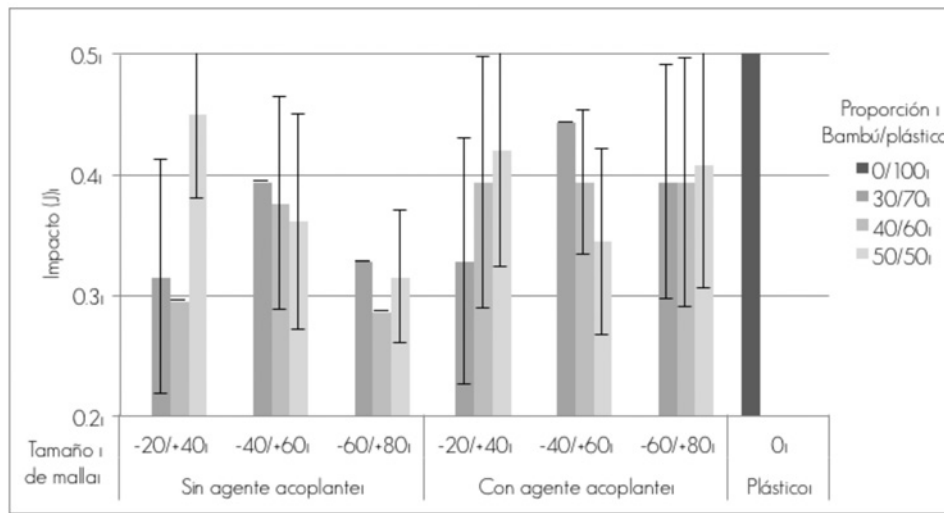


Figura 6. Resistencia al impacto de los materiales compuestos bambú/plástico.

Figure 6. Resistance of bamboo/plastic composite materials to impact.

Faruk *et al.* (2012) indican que el ensayo de impacto es la habilidad del material para resistir una fractura, luego de un esfuerzo aplicado a gran velocidad. Kumar *et al.* (2014) enfatizan que las fibras son importantes porque transmiten el esfuerzo a la matriz. En un estudio de Kinochita *et al.* (2009) señalan que los valores de impacto son directamente proporcionales con el aumento del tamaño de partículas. Cárdenas (2012) obtuvo valores entre 660 y 682 J m⁻¹, Lisperguer *et al.* (2013) entre 6 a 7 J m⁻¹ para compuestos con 50 por ciento de refuerzo. Bahari y Krause (2016) registran un valor de 3.8 kJ m⁻² para compuestos con 25 por ciento de refuerzo no pudiendo superar el valor del plástico 20 kJ m⁻².

Durowaye *et al.* (2014) documentan de 1.9 a 1.2 para compuestos con 25 % de partículas de sisal. Los valores de las probetas evaluadas son inferiores, y ninguna formulación superó el valor del plástico; lo anterior responde a una inadecuada adhesión de los materiales, que genera microespacios entre las partículas y la matriz, además al incrementar la cantidad de partículas puede haber una aglomeración de las mismas, por la pobre dispersión en la matriz (Stark y Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause, 2016).

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con la concentración de agente acoplante (p = 0.0001) y la doble interacción entre el tamaño de malla, con la proporción de mezcla (p<0.0001) y la concentración de agente acoplante (p = 0.0187), pero no con las otras variables (p>0.0814). La comparación múltiple de medias, indica que la mejor combinación resultó usando el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 50/50 y 40/60, y cuando se usó MAPP (Cuadro 7).

Faruk *et al.* (2012) point out that the impact trial is the ability of the material to resist a fracture after stress is applied at a high speed. Kumar *et al.* (2014) emphasize the importance of the fibers in transmitting the stress to the matrix. A study by Kinochita *et al.* (2009) shows the values of impact to be directly proportional to the increase in particle size. Cárdenas (2012) registers values of 660 to 682 K m⁻¹, while Lisperguer *et al.* (2013) obtained values of 6 to 7 J m⁻¹ for composites with 50 % reinforcement. Bahari and Krause (2016) record a value of 3.8 kJ m⁻² for composites with 25 % reinforcement; both these values are lower than the 20 kJ m⁻² obtained for plastic.

Durowaye *et al.* (2014) document a value of 1.9 to 1.2 for composites with 25 % sisal particles. The values for the assessed test specimens are lower, and no formulation exceeded the value for plastic. This is due to an inadequate adhesion of the materials, which generates microspaces between the particles and the matrix; furthermore, as the number of particles increases, these may cluster due to poor dispersion in the matrix (Stark and Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari and Krause, 2016).

The statistical analysis evidenced the presence of significant differences in the coupling agent concentrations (p = 0.0001) and in the double interaction between mesh size and mixing ratio (p<0.0001) and coupling agent concentration (p = 0.0187), but not in regard to other variables (p>0.0814). The multiple mean comparison indicates that the best combination resulted from the use of a -60/+80 particle size, the 50/50 and 40/60 mixing ratios and MAPP (Table 7).

Cuadro 7. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para el ensayo de impacto.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	0.36	A	50/50	0.38	A	0	0.34	B
-40+60	0.37	A	40/60	0.36	A	2	0.39	A
-60+80	0.36	A	30/70	0.36	A			

Table 7. Multiple mean comparison using Tukey's test for the impact trial.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	0.36	A	50/50	0.38	A	0	0.34	B
-40+60	0.37	A	40/60	0.36	A	2	0.39	A
-60+80	0.36	A	30/70	0.36	A			

Se observó que en las mayorías de las formulaciones con MAPP hubo un incremento en las propiedades mecánicas, debido al incremento en la adhesión interfacial de la presencia del agente acoplante (Lisperguer *et al.* 2013).

Conclusiones

Los materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80, 30 por ciento de contenido de partícula de bambú y con agente acoplante registran valores más altos. Los materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40, 50 por ciento de contenido de partícula de bambú y sin agente acoplante presentan los menores valores.

La resistencia máxima a tensión y flexión para la mayoría de los materiales compuestos fue inversamente proporcional al aumento de partículas de bambú y directamente proporcional al agente acoplante, sin superar al plástico; mientras que el módulo de elasticidad en ambas propiedades aumenta en forma directa con el contenido de partículas y el agente acoplante, por encima del plástico.

La resistencia al impacto para los materiales compuestos es directamente proporcional, cuando se agrega agente acoplante.

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ, por apoyar y financiar parte de la investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014; así mismo, a la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente a mi Facultad Ciencias Forestales, al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) en especial al Ing. Javier Gago y al Ing. Carlos Rojas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Karen Catherine Lázaro León: procesamiento de la materia prima, evaluación de las propiedades, análisis de datos y revisión de manuscrito; Héctor E. Gonzáles Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa: revisión del manuscrito.

Referencias

- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003a. Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. ASTM D 638-03. West Conshohocken, PA, USA. 17 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003b. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D 790-03. West Conshohocken, PA, USA. 11 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2004. Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact). ASTM D 5420-04. West Conshohocken, PA, USA. 8 p.

In most formulations with MAPP there was an increase in the mechanical properties due to the increased interfacial adhesion obtained with the use of a coupling agent (Lisperguer *et al.* 2013).

Conclusions

Composite materials made with a -60/+80 mesh size, a 30 % content of bamboo particles and a coupling agent register the highest values. Composites made using a -20/+40 mesh size, 50 % bamboo particles and no coupling agent have the lowest values.

The maximum resistance to tension and flexion for most composite materials was inversely proportional to the increase in the number of bamboo particles and directly proportional to the amount of coupling agent, without exceeding the values for plastic, whereas the modulus of elasticity for both properties increases in direct proportion to the content of particles and of a coupling agent, with values above those of plastic.

Resistance to impact for the compound materials is directly proportional when a coupling agent is added.

Acknowledgements

The authors would like to express our gratitude to the *Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ* (National Program of Innovation for Competitiveness and Productivity) for the support it provided and for having funded part of the research under project 414-PNICP-PIAP-2014, as well as to the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (La Molina National Agrarian University), particularly to my Faculty of Forestry, and to the *Instituto Peruano de Energía Nuclear* (Peruvian Institute of Nuclear Energy, IPEN), especially to Javier Gago, Eng., and to Carlos Rojas, Eng.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

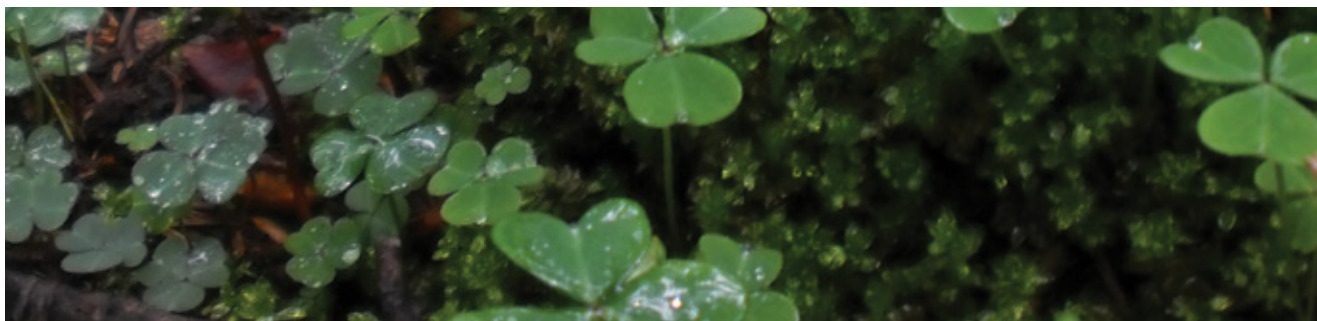
Contribution by author

Karen Catherine Lázaro León: raw material processing, assessment of properties, data analysis and writing of the paper; Héctor E. González Mora and Aldo J. Cárdenas Oscanoa: review of the manuscript.

End of the English version



- Bahari, S. and A. Krause. 2016. Utilizing Malaysian bamboo for use in thermoplastic composites. *Journal of Cleaner Production* 110: 16 - 24.
- Brief, L. 2011. Opportunities in Natural fiber Composites. <http://www.lucintel.com/lucintelbrief/potentialofnaturalfibercompositesfinal.pdf> (25 de diciembre de 2015).
- Cárdenas, A. 2012. Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino. Tesis Mg. Sc. Productos Forestales. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal, México. 145 p.
- Chen, Y., N. Stark, M. Tshabalala, J. Gao and Y. Fan. 2014. Properties of wood-plastic composites (WPCs) reinforced with extracted and delignified wood flour. *Holzforschung* 68(8): 933 - 940.
- Durowaye, S. I., G. I. Lawal and O. I. Olagbaju. 2014. Microstructure and Mechanical Properties of Sisal Particles Reinforced Polypropylene composite. *International Journal of Composite Materials* 4(4): 190 - 195.
- Faruk, O., A. Bledzki, H. Fink and M. Sain. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science* 37: 1552 - 1596.
- Fuentes, C. A., L. Q. N. Tran, M. V. Hellemont, V. Janssens, C. Dupont-Gillain, A. W. Van Vuure and I. Verpoest. 2013. Effect of physical adhesion on mechanical behavior of bamboo fibre reinforced thermoplastic composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 418: 7-15.
- González, H. 2005. Elaboración de una propuesta para el aprovechamiento y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca-Oxapampa). Informe Final. Lima, Perú. 95 p.
- Idrus, M., S. Hamdan, M. Rahman and M. Islam. 2011. Treated Tropical Wood Sawdust-Polypropylene Polymer Composite: Mechanical and Morphological Study. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 2: 435 - 444.
- Kinochita H., K. Kaizu, M. Fukuda, H. Tokunaga, K. Koga and K. Ikeda. 2009. Development of green composite consists of woodchips, bamboo fibers and biodegradable adhesive. *Composites Part B: Engineering* 40(7): 607 - 612.
- Lisperguer, J., X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar and H. Venegas. 2013. Efecto de las Características de Harina de Madera en las Propiedades físico-mecánicas y térmicas de Polipropileno Reciclado. *Revista Maderas. Ciencia y tecnología* 15(3): 321 - 336.
- Liu, H., Q. Wu, G. Han, F. Yao, Y. Kojima and S. Suzuki. 2008. Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(12): 1891 - 1900.
- López, J. P., S. Boufi, N. E. Mansouri, P. Mutjé and F. Vilaseca. 2012. PP composites based on mechanical pulp, deinked newspaper and jute strands: A comparative study. *Composites Part B: Engineering* 43(8): 3453 - 3461.
- Martínez-López, Y., R. Fernández-Concepción, D. Álvarez-Lazo, M. García-González y E. Martínez-Rodríguez. 2014. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 20 (3): 227 - 236.
- Mattos, B. D., A. L. Misso, P. H. G. de Cademartori, E. A. de Lima, W. L. E. Magalhães and D. A. Gatto. 2014. Properties of polypropylene composites filled with a mixture of household waste of mate-tea and wood particles. *Construction and Building Materials* 61: 60 - 68.
- Moya V., C., H. Poblete W. y L. Valenzuela H. 2012. Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza de madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeado por inyección. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1): 13 - 29.
- Mutjé, P., F. Vilaseca, M. E. Vallejos, A. López, J. Gironès, J. A. Méndez y M. A. Pelach. 2006. Fibras de plantas madereras recicladas vs filamentos de plantas anuales en el refuerzo de matrices termoplásticas. <http://www.riadicyp.org/index.php/ciadicyp-2006/madera-y-materias-primas/send/49-madera/584-fibras-de-plantas-madereras-recicladas-vs-filamentos-de-plantas-anuales-en-el-refuerzo-de-matrices-termoplasticas> (15 de febrero de 2015).
- Naghmouchi, I., S. Boufi, M. Delgado, L. Granda, F. Vilaseca y P. Mutjé. 2013. Fabricación de madera plástica a partir de serrín de hueso de aceituna y polipropileno. In: XIII Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales. 17 de enero de 2016. Puerto Iguazú, Argentina. 7 p.
- Pérez, A. 2012. Pequeña historia de los materiales compuestos. <http://albertoperez.tumblr.com/post/23554188761/peque%C3%B1a-historia-de-los-materiales-compuestos> (14 de marzo de 2016).
- Ravi, K. N., Ch. Ranga R., B. Raghava and K. Srinivas. 2014. Mechanical Properties of Vakka Fiber Reinforced Polypropylene Composites. In: Thansekhar, M. R. and N. Balaji (eds.). International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET). LN. College of Engineering and Technology. International Journal of Innovate Research in Science, Engineering and Technology (IJRSET) 3(3): 1162 - 1166.
- Rosa, S., E. Santos, C. Ferreira and S. Nachtigall. 2009. Studies on the Properties of Rice-Hulk-Filled-PP Composites- Effect of Maleated PP. *Materials Research* 12 (3): 333 - 338.
- Samaraha, A., A. Hemmasi, I. Ghasemi, B. Baziyar and M. Nemat. 2015. Effects of nanoclay contents on properties of bagasse flour/reprocessed high density polyethylene/nanoclay composites. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17 (3): 637 - 646.
- Santos, P., S. Bragança, E. Ayres, P. Santiago and R. Lambert. 2012. The Potential of Bamboo in the Design of Polymer Composites. *Materials Research* 15 (4): 639 - 644.
- Statistical Analysis System (SAS). 2008. The SAS System for Windows version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Stark, N., and R. Rowland. 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood Fiber Science* 35 (2): 167 - 174.
- Takatani, M., A. Ishikawa, K. Sakamoto, K. Ikeda and T. Okamoto. 2008. The properties of Bamboo Flour-Plastic Composites with High Filler Content Formulations. *Journal of The Adhesion Society of Japan* 44(6): 214 - 219.
- Venkateshwaran, N., A. Elayaperumal and G. Sathiya. 2012. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. *Composites: Part B* 43: 793 - 796.



CONSEJO ARBITRAL

Argentina

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.- M.Sc. Leonel Harrand
Museo Argentino de Ciencias Naturales.- Dra. Ana María Faggi
Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA).- Dr. Eduardo Martínez Carretero

Canadá

Université Laval, Québec.- Ph. D. Roger Hernández

Cuba

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical.- Dra. Amelia Capote Rodríguez
Unión Nacional de Escritores y Artistas de Cuba.- Dra. Raquel Carreras Rivero

Chile

Universidad del Bío Bío.- Dr. Rubén Andrés Ananías Abuter

España

CIFOR-INIA.- Dr. Eduardo López Senespleda, Dr. Gregorio Montero González, Dr. Sven Mutke Regneri
Fundación CEAM.- Dra. María José Sáiz Sánchez
Universidad de Oviedo.- Dr. Elías Afif Khouri
Universidad Politécnica de Madrid.- Dr. Alfredo Blanco Andray, Dr. Luis Gil Sánchez, Dr. Alfonso San Miguel-Ayanz,
Dr. Eduardo Tolosana, Dr. Santiago Vignote Peña

Estados Unidos de América

New Mexico State University.- Ph.D. John G. Mexal
Northern Arizona University .- Ph.D. Peter Z. Fulé
University of Colorado at Denver.- Ph.D. Rafael Moreno Sánchez
University of Florida.- Ph.D. Francisco Javier Escobedo Montoya
United States Department of Agriculture, Forest Service.- Dr. Mark E. Fenn, Dr. Carlos Rodriguez Franco

Italia

International Plant Genetic Resources Institute.- Dra. Laura K. Snook

México

Asociación Mexicana de Arboricultura.- Dr. Daniel Rivas Torres
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.- Dr. José F. Conrado Parraguirre Lezama
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Dra. Luz María del Carmen Calvo Iribién
Ph.D. José Luis Hernández Stefanoni
Centro de Investigación y Docencia Económicas.- Dr. Alejandro José López-Feldman
CENTROGEO / CONACYT.- Dra. Alejandra López Caloca
Colegio de la Frontera Sur.- Dr. Bernardus H. J. de Jong, Dr. Mario González Espinosa, Ph.D. Jorge E. Macías Sámano,
Dr. Neptalí Ramírez Marcial, Dr. Cristian Tovilla Hernández, Dr. Henricus Franciscus M. Vester
Colegio de Postgraduados.- Dr. Arnulfo Aldrete, Dr. Dionicio Alvarado Rosales, Dr. Víctor M. Cetina Alcalá,
Dra. Ma. de Lourdes de la Isla de Bauer, Dr. Héctor M. de los Santos Posadas, Dr. Armando Equihua Martínez,
Dr. Ronald Ferrara-Cerrato, Dr. Edmundo García Moya, Dr. Manuel de Jesús González Guillén, Dr. Jesús Jasso Mata,
Dr. Lauro López Mata, Dr. Javier López Upton, Dr. Martín Alfonso Mendoza Briseño, Dr. Antonio Trinidad Santos,
Dr. Juan Ignacio Valdés Hernández, Dr. José René Valdez Lazalde, Dr. J. Jesús Vargas Hernández,
Dra. Heike Dora M. Vibrans Lindemann
El Colegio de México.- Dra. María Perevochtchikova

El Colegio de Tlaxcala, A.C.- M.C. Noé Santacruz García

Instituto de Ecología, A. C.- Dr. Pedro Guillermo Ángeles Álvarez, Dr. Ismael Raúl López Moreno

Instituto Politécnico Nacional.- Dr. Alejandro Daniel Camacho Vera, Ph.D. José de Jesús Nívar Cháidez, M.C. D. Leonor Quiroz García, Ph.D. Sadoth Sandoval Torres

PRONATURA.- Dr. José A. Benjamín Ordoñez Díaz

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.- Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo, M.C. Salvador Valencia Manzo

Universidad Autónoma Chapingo.- M.C. Beatriz Cecilia Aguilar Valdez, M.C. Baldemar Arteaga Martínez, Dra. Emma Estrada Martínez, M.C. Mario Fuentes Salinas, M.C. Enrique Guízar Nolasco, Dra. María Isabel Palacios Rangel, Dr. Hugo Ramírez Maldonado, Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, Dr. Leonardo Sánchez Rojas, Dr. Enrique Serrano Gálvez, Dra. Ernestina Valadez Moctezuma

Universidad Autónoma de Baja California Sur.- Dr. José Antonio Martínez de la Torre

Universidad Autónoma de Chihuahua.- Ph.D. Concepción Luján Álvarez, Ph.D. Jesús Miguel Olivas García

Universidad Autónoma de Guadalajara.- Dr. Mauricio Alcocer Ruthling

Universidad Autónoma de Nuevo León .- Dr. Glafiro J. Alanís Flores, Dr. Enrique Jurado Ybarra, Dr. José Guadalupe Marmolejo Monsiváis, Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Universidad Autónoma de Querétaro.- Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Universidad Autónoma de San Luis Potosí.- M.C. Carlos Arturo Aguirre Salado

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.- Dra. Ana Laura López Escamilla, Dr. Ángel Moreno Fuentes

Universidad Autónoma del Estado de México.- Dr. Darío Ibarra Zavala, Dr. Armando Burgos-Solorio

Universidad Autónoma Indígena de México.- Dra. Hilda Susana Azpiroz Rivero

Universidad Autónoma Metropolitana.- Dr. Héctor Castillo Juárez, Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera

Universidad de Guadalajara.- Dr. Luis Ramón Bravo García, Dr. Ezequiel Delgado Fourné, M.C. Francisco Javier Fuentes Talavera, M.C. María Guadalupe Lomelí Ramírez, M.C. Roberto Novelo González, Dr. Rubén Sanjuán Dueñas

Universidad del Mar.- M.C. Verónica Ortega Baranda

Universidad Juárez del Estado de Durango.-Dr. Javier Leonardo Bretado Velázquez, Dr. Hermes Alejandro Castellanos Bocaz, Dr. José Javier Corral Rivas, Ph.D. José Ciro Hernández Díaz, Dr. Marín Pompa García, Dr. José Ángel Prieto Ruíz

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.- Dr. José Cruz de León, M.C. Marco Antonio Herrera Ferreyra, Dr. Alejandro Martínez Palacios, Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, Dr. David Zavala Zavala

Universidad Nacional Autónoma de México.- Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders, Dr. Humberto Bravo Álvarez, Dra. Eliane Ceccón, Dr. Joaquín Cifuentes Blanco, Dr. Abisaf Josué García Mendoza, Dr. Roberto Garibay Orijel, Dr. Julio Alberto Lemos Espinal, Dr. Daniel Piñero Dalmáu, Dr. Américo Saldívar Valdés, Dra. Teresa Terrazas Salgado, M. C. Verónica del Pilar Reyero Hernández, Dra. Ana Laura Wegier Briuolo

Universidad Veracruzana.- Dr. Lázaro Rafael Sánchez Velásquez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.- Dr. Miguel Acosta Mireles, Dr. Juan de Dios Benavides Solorio, Dr. Fernando Carrillo Anzures, Dr. Carlos Román Castillo Martínez, Dr. José Gilberto Chávez León, Dr. José Germán Flores Garnica, M.C. Antonio González Hernández, Dr. Vidal Guerra de la Cruz, Dr. José Amador Honorato Salazar, Dr. Fabián Islas Gutiérrez, Dr. Emiliano Loeza Kuk, M.C. José Francisco López Toledo, Dr. Martín Martínez Salvador, Dra. Aixchel Maya Martínez, Dr. José Isidro Melchor Marroquín, M.C. Carlos Mallén Rivera, Dr. Ramiro Pérez Miranda, Dr. Guillermo Sánchez Martínez, Dr. Erasto Domingo Sotelo Ruiz, Dr. Arturo Gerardo Valles Gándara, Dr. José Villanueva Díaz, M.C. Eulalia Edith Villavicencio Gutiérrez, Dr. Fernando Carrillo Anzures, Dr. Francisco Becerra Luna, M.C. Georgette Moctezuma López, M.C. Francisco Moreno Sánchez, M.C. Martín Enrique Romero Sánchez, Dr. Juan Carlos Tamarit Urias, M.C. Efraín Velasco Bautista

Consultores Privados.- Dr. Gustavo Cruz Bello, M.C. Juan Islas Gutiérrez, M.Sc. Rosalía A. Cuevas Rangel, Dra. Teresita del Niño Jesús Marín Hernández

El envío de artículos, ensayos y notas técnicas; así como, las instrucciones y fuente tipográfica para su presentación las puede consultar en la página www.cienciasforestales.inifap.gob.mx

Para su recepción se deberá cubrir una cuota de \$ 750.00 (Setecientos cincuenta pesos 00/100 M.N.) y para su publicación de \$ 350.00 (Trescientos cincuenta pesos 00/100 M.N.) por página completa publicada (traducción y gastos de edición).

El pago de suscripciones y publicación de artículos se realizará por medio de un depósito a nombre del INIFAP/CENID-COMEF, en la cuenta No. 0657617851, Clabe Interbancaria 072 180 00657617851 2, del Grupo Financiero BANORTE, Sucursal No. 2037. En el caso de suscripciones internacionales, la Clave SWIFTT correspondiente es: MENOMXMT. Se deberá enviar copia del depósito por correo electrónico. Si el pago es con cheque, se requiere expedirlo a nombre del INIFAP/CENID-COMEF.

Precios de suscripción (incluye envío)			
Nacional:	\$	600.00	Institucional / Individual
Extranjero	\$	90.00 USD	Institucional / Individual

Toda correspondencia relacionada con la revista, favor de dirigirla a:

Editor en Jefe de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales
Av. Progreso No. 5
Barrio de Santa Catarina
delegación Coyoacán
C.P. 04010 Ciudad de México, México.
Correo-e: cienciasforestales@inifap.gob.mx
Teléfono: (+52-55) 3626-8697
Conmutador: (+52-55) 3626-8700 ext. 112

Producción: Marisela C. Zamora Martínez
Cuidado de la Edición: Marisela C. Zamora Martínez
Diseño y formación: Silvia Onodera Hamano
Asistencia técnica: Miguel Ángel Cruz Reyes
Asistencia editorial: Laura Gabriela Herrerías Mier
Asistencia administrativa: Rosalía Cano Santamaría
Impresión, encuadernación y terminado:
Graphx, S.A. de C.V.

El

Volumen 7,
Número 38 de la
*Revista Mexicana de Ciencias
Forestales*, es una versión íntegra
y fiel de la impresa en noviembre
de 2016 por: Graphx, S.A. de C.V.
Tacuba 40 - 205, Col. Centro C.P.
06010, deleg. Cuauhtémoc,
México, D.F.

Vol. 7 Núm. 38 2016

Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión
Chemistry of plant biomass upon yield during torrefaction: a review

Áreas naturales protegidas y sistema de uso común de recursos forestales en el Nevado de Toluca
Protected natural areas and common use system of forest resources in *Nevado de Toluca*

Selección de árboles semilleros de *Juglans pyriformis* Liebm. en poblaciones naturales de Coatepec y Coacoatzintla, Veracruz
Juglans pyriformis Liebm. seed tree selection in natural populations of *Coatepec and Coacoatzintla, Veracruz*

Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino
Variation of carbon distribution between the root and the aerial part in three pine species

Histopatología de raíces de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. y de *Pinus pseudostrabus* Lindl. infectadas con *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922
Histopathology of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. and *Pinus pseudostrabus* Lindl. roots infected by *Phytophthora cinnamomi* Rands, 1922

Evaluación de las propiedades físicas de material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno
Physical properties of materials made of bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno
Mechanical properties of the composite material made with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene