

Revista Mexicana de Ciencias Forestales



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS FORESTALES

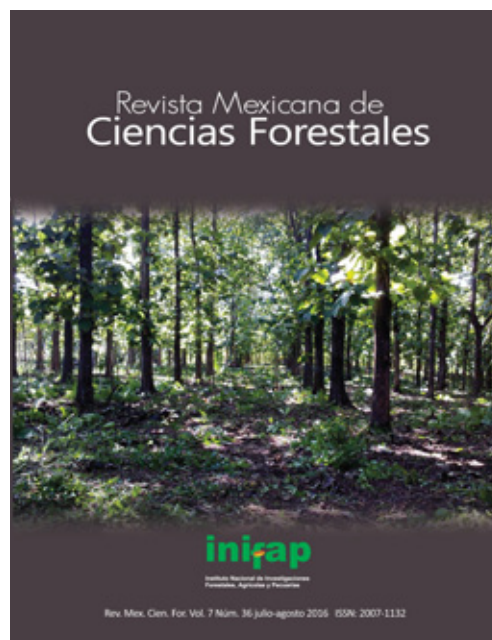
www.cienciasforestales.inifap.gob.mx

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 Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica, 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 36, julio-agosto 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 36 de la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, es una versión íntegra y fiel de la impresa en julio de 2016 por: Graphx, S.A. de C.V. Tauba 40 - 205 Col. Centro, C.P. 06010, deleg. Cuauhtémoc, Ciudad de México.



Portada: Plantación de teca. José Vidal Cob Uicab.

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

Extensionismo Forestal

Marisela Cristina Zamora Martínez



ARTÍCULOS

Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota

Forest parameter estimation in conifer forests using remote sensing techniques

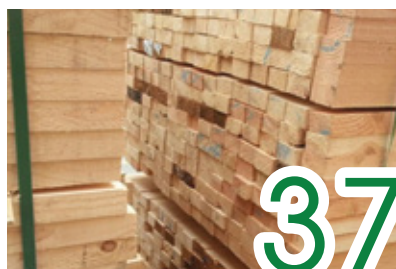
Gustavo Torres-Rojas, Martín Enrique Romero-Sánchez, Efraín Velasco-Bautista y Antonio González-Hernández



Fusarium oxysporum Schltdl. y *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. causantes de la marchitez de plántulas de *Pinus* spp. en vivero

Fusarium oxysporum Schltdl. and *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. cause wilting of *Pinus* spp. seedlings in the nursery

Leticia Robles Yerena, Santos Gerardo Leyva Mir, Armando Cruz Gómez, Moisés Camacho Tapia, Daniel Nieto Ángel y Juan Manuel Tovar Pedraza



Rendimiento en calidad de la madera aserrada de pino

Pine lumber grade recovery as a function of log characteristics

Rolando Orozco Contreras, José Ciro Hernández Díaz, Juan Abel Nájera Luna, Pedro Antonio Domínguez Calleros, José Rodolfo Goche Telles, Pablito Marcelo López Serrano y José Javier Corral Rivas



Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios

Biomass in bushes, weeds and on the forest floor as a risk factor of fires

Jorge Hernández García, Gerardo Rodríguez Ortíz, José Raymundo Enríquez del Valle, Gisela Virginia Campos Ángeles y Adán Hernández Hernández



Calidad de planta de *Cedrela odorata* L. asociada con prácticas culturales de vivero

Plant quality of *Cedrela odorata* L. associated with nursery cultural practices

Erickson Basave Villalobos, Lucía Concepción García Castillo, Aurelio Castro Ríos, Celi Gloria Calixto Valencia, José Ángel Sigala Rodríguez y José Luis García Pérez



Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en bosques de coníferas, con escenarios de cambio climático

Potential distribution of *Lophodermium* spp. in conifer forests, with climate change scenarios

Ramiro Pérez Miranda, Martín Enrique Romero Sánchez, Antonio González Hernández, Eduardo Pérez Sosa y Víctor Javier Arriola Padilla



Crecimiento de *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculada con hongos micorrizogenos arbusculares y rizobacterias

Growth of *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria

Juan Francisco Aguirre-Medina, Juan Francisco Aguirre-Cadena, Miguel Antonio Ramón-Castro



Editorial

Extensionismo Forestal

La generación de conocimientos, además de cumplir la función de responder a las interrogantes que el entorno le plantea al hombre, debe de reflejarse en el desarrollo de tecnologías que contribuyan a mejorar su calidad de vida, le den seguridad alimentaria y garanticen el manejo sustentable de los bienes y servicios que le proporcionan los diversos ecosistemas forestales.

Asimismo, las innovaciones tecnológicas, una vez liberadas, pasan por un proceso previo a su adopción, el cual incluye su validación y su transferencia. Esta última, es de gran relevancia, pues de su buena ejecución depende, en gran medida, la incorporación de la tecnología a los procesos productivos de una comunidad.

En el éxito de la transferencia de tecnología inciden varios factores: la disponibilidad de financiación, de insumos, la presencia de extensionistas, la capacitación, por señalar algunos de los más sobresalientes.

El extensionismo, como tal, en México data de la segunda década del siglo XX, cuando se incorporaron jóvenes agrónomos al trabajo en el campo, con el propósito de llevar a la práctica los conocimientos adquiridos durante su formación académica, todo ello bajo el auspicio del Gobierno. Durante su desarrollo se han identificado diversas transformaciones, en principio funcionó como una herramienta para consolidar la reforma agraria, posteriormente se fomentó la difusión de paquetes tecnológicos, y en épocas más recientes se dio prioridad a la difusión de componentes tecnológicos que aumenten la eficiencia productiva.

El interlocutor entre el investigador y el productor es el extensionista, de cuyas capacidades y habilidades depende, en gran medida, el éxito de la transferencia; este personaje es el responsable de coordinar, informar, promocionar y capacitar a los productores, quienes son los receptores de las tecnologías generadas en las instituciones académicas y de investigación.

Ante la globalización y las modificaciones constantes del ambiente, en respuesta a los cambios de uso de suelo y a los efectos del cambio climático, los extensionistas además de las aptitudes propias de su formación profesional, deben contar con habilidades que les permita usar los programas de cómputo más recientes, el manejo de herramientas visuales de vanguardia que les garantice una comunicación asertiva con los dueños o poseedores de los recursos. Debe ser creativo, tener liderazgo, abierto a la colaboración y, sobre todo, al trabajo en equipo; lo que le facilitará incorporar a su quehacer las actividades de tipo participativo, para a partir ellas reconocer a los productores como los actores sociales del proceso productivo, que, a su vez, favorecerá la aceptación de las tecnologías sujetas a la transferencia, en primera instancia, y la adopción de las mismas, en el futuro cercano.

En el ámbito forestal, el extensionismo constituye un mecanismo para poner a disposición de los productores las tecnologías disponibles en el sector académico de manera oportuna, clara y eficiente; mediante un permanente diálogo que favorezca el intercambio de ideas y conocimientos que conlleven a la ejecución de acciones conjuntas y al establecimiento de compromisos que sean el garante de la adopción de las innovaciones tecnológicas que concluyan en el manejo sustentable de los recursos forestales, así como en la mejora de los procesos productivos, en general.

El extensionista debe aliarse con la comunidad a fin de reforzar las capacidades internas que le permitan, de manera conjunta con los productores, planificar, ejecutar y evaluar proyectos rentables que, además, garanticen el manejo sustentable de sus recursos naturales.

Así, la estrategia cinco del Programa Nacional de Desarrollo Forestal hace referencia a la transferencia del conocimiento y tecnología que contribuya a incrementar el nivel de competitividad del sector, agregando valor a las materias primas, mejorando procesos productivos y contribuyendo al desarrollo forestal sustentable.

En el contexto de dicha estrategia se precisa que la tecnología debe atender las necesidades de los sectores productivo e industrial; asimismo se resalta que la oferta tecnológica no responde a una estrategia nacional y es prácticamente desconocida por los usuarios.

En este contexto, resulta importante que el extensionista lleve a cabo su trabajo en el marco de la metodología participativa, la cual fomenta el intercambio de conocimientos y con ello la elección de la tecnología que responda mejor a los requerimientos ecológicos, sociales, económicos y productivos de las comunidades involucradas.

En la estrategia antes referida se indica la necesidad de "diseñar y consolidar mecanismos de transferencia de tecnología para que lleguen a todos los usuarios posibles". Algunos de estos incluyen el apoyo financiero y técnico a través de convocatorias por Lineamientos; Además de fomentar un programa de extensionismo forestal, que incentive la transferencia de tecnología, especialmente, entre productores del sector social insertos en la cadena de valor. Dicho programa constituye la línea de acción 5.4 de la estrategia cinco del Programa Nacional de Desarrollo Forestal. Finalmente, algunos factores que inciden en el éxito del extensionismo forestal, y, por lo tanto, deben estar presentes cuando se implemente un programa de este tipo se anotan a continuación:

- Promover la participación multinstitucional.
- Facilitar el acceso a la información y a las alternativas tecnológicas, mediante el uso de medios electrónicos y de comunicación abierta y masiva, tanto de los extensionistas como de los grupos beneficiarios
- Favorecer planteamientos reflexivos y de aprendizaje, a todos los niveles: productores, extensionistas, investigadores y autoridades (local, estatal, federal); además, que fomenten la retroalimentación entre sus diferentes componentes.
- Propiciar la profesionalización de los extensionistas, la creación de redes y la rendición de cuentas;
- Integrar los métodos participativos y los sistemas de ordenación dentro de los servicios de extensión forestal.

Marisela Cristina Zamora Martínez







Artículo / Article

Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota

Forest parameter estimation in conifer forests using remote sensing techniques

Gustavo Torres-Rojas¹, Martín Enrique Romero-Sánchez^{2*},
Efraín Velasco-Bautista² y Antonio González-Hernández²

Resumen

El objetivo principal fue evaluar la capacidad de dos plataformas satelitales: *SPOT* y *Quickbird*[®] para la estimación de parámetros forestales de interés en un área bajo manejo, localizada en los límites entre el Estado de México y Michoacán. Se comparó la precisión de las estimaciones contra datos de campo. Los parámetros estimados fueron altura total, diámetro normal y carbono aéreo. Se calcularon diferentes índices de vegetación para usarse como variables predictoras y se utilizó la prueba de correlación de Pearson (r) para determinar el grado de asociación de los datos obtenidos en campo con las diferentes variables derivadas de las imágenes de satélite. Las variables respuesta con alta correlación con la predictora y con baja correlación entre sí, fueron seleccionadas para la estimación de cada uno de los parámetros, a través de modelos de regresión. La validación de estos se llevó a cabo usando la raíz del error cuadrático medio (RECM) y RECM relativo de las estimaciones contra los datos medidos en campo. Los resultados mostraron correlaciones negativas importantes ($SPOT = -0.60, -0.75$; $Quickbird = -0.58, -0.80$). El análisis de regresión señaló buenos ajustes en todos los casos ($R^2 = 0.59-0.91$). Para la validación de los modelos (RECM) se obtuvieron los valores más bajos en diámetros y alturas: 5.15 cm y 2.50 m, respectivamente, en el caso de la imagen *SPOT 5 HRG*, mientras que con la imagen *Quickbird* el valor más bajo fue para carbono aéreo (0.77 Mg C).

Palabras clave: Atributos forestales, manejo forestal, *Quickbird*, regresión, sensores remotos, *SPOT*.

Abstract

The main objective was to evaluate the capacity of two satellite platforms: *SPOT* and *Quickbird*[®] in order to estimate the forest parameters of interest in an area under management, located between the borders of the State of Mexico and Michoacán. The accuracy of the estimation was compared with field data. The estimated parameters were total height, normal diameter and aboveground carbon. Various vegetation indices were estimated and used as predictive variables, and Pearson's (r) correlation test was utilized to determine the degree of association between the data obtained in field and the different variables derived from the satellite images. Response variables showing a high correlation with the predictive variable and a low correlation between each other were selected in order to estimate each of the parameters using regression models. These were validated using the root mean square error (RMSE) and the relative RMSE of the estimations against the data measured in field. The results showed significant negative correlations ($SPOT = -0.60, -0.75$; $Quickbird = -0.58, -0.80$). The regression analysis showed good adjustments in all cases ($R^2 = 0.59-0.91$). For the validation of the models (RMSE), the lowest values in diameter and height -5.15 cm and 2.50 m, respectively- were obtained in the case of the *SPOT 5 HRG* image, while the lowest value in the *Quickbird* image was for aboveground carbon (0.77 Mg C).

Key words: Forest attributes, forest management, *Quickbird*, regression, remote sensing, *SPOT*.

Fecha de recepción/Reception date: 27 de marzo de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 20 de julio de 2016.

¹ Programa de Vigilancia Entomológica del Dengue. Servicios de Salud Pública. Ciudad de México, México

² Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. Ciudad de México, México. INIFAP. Correo-e: romero.martin@inifap.gob.mx.

Introducción

La percepción remota aplicada al manejo forestal comprende, principalmente, cuatro categorías: clasificación de la cobertura forestal, estimación de atributos forestales, detección de cambios en el bosque y modelado espacial (Franklin, 2001). Dentro de estas, la estimación de atributos forestales mediante sensores remotos es de particular interés en el área de manejo forestal sustentable, ya que ofrece la posibilidad de obtener información consistente, coherente y transparente; además de, la de tipo espacial explícita en áreas de difícil acceso (Herold *et al.*, 2011). Desde la década pasada, el cálculo de variables forestales ha evolucionado, de una actividad basada, sobre todo, en inventarios forestales en campo, a un esfuerzo asistido por sensores remotos (Miranda-Aragón *et al.*, 2013; Asner y Mascaro, 2014).

El continuo avance en el mejoramiento de las capacidades de los diferentes tipos de sensores ofrece la oportunidad de desarrollar técnicas de análisis que maximicen las capacidades de las plataformas satelitales disponibles.

La estimación de parámetros biofísicos (medidos en los inventarios forestales) a partir de sensores remotos se divide principalmente en métodos estadísticos y físicos (Häme *et al.*, 2013). Los primeros usan estimaciones bajo el supuesto de una buena correlación estadística entre datos satelitales y las variables de interés (Aguirre-Salado *et al.*, 2012a; Song, 2013; Wulder *et al.*, 2014). Los segundos consisten en realizar mediciones directas en campo, de manera tal que sirvan como variables auxiliares en las estimaciones (GOFC-GOLD, 2011).

La mejora de las plataformas y sensores, en términos de resolución espacial, temporal y radiométrica (Roy *et al.*, 2014) así como, el acceso a bases de datos satelitales de forma gratuita (Woodcock *et al.*, 2008) permitió que la investigación relacionada con la extracción de información biofísica de imágenes satelitales multispectrales se haya incrementado exponencialmente en los últimos años (Wulder *et al.*, 2008; 2012). El acceso a imágenes satelitales de alta resolución espacial (e.g. *Quickbird*®, *Geoeye*®) posibilita nuevas opciones para la estimación de características biofísicas del arbolado de manera indirecta, lo cual minimiza el costo de hacerlo mediante inventarios tradicionales (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

En México, la utilización de tecnología satelital se ha enfocado a la detección de cambios en la cobertura arbórea (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006; Aguirre-Salado *et al.*, 2012; Gebhardt *et al.*, 2014), y el monitoreo aplicado al manejo forestal se ha encaminado, básicamente, a variables tales como área basal, biomasa área (Aguirre-Salado *et al.*, 2014), y en segundo plano, las estimaciones de volumen en pie y algunas variables dasométricas importantes para el manejo forestal: diámetro normal y altura total.

Introduction

Remote sensing applied to forest management comprises mainly four categories: forest cover classification, estimation of forest attributes, detection of changes in the forest and spatial modeling (Franklin, 2001). Among these, the estimation of forest attributes using remote sensing is of particular sense in the area of sustainable forest management, as it offers the possibility to obtain consistent, coherent and transparent information, besides explicit spatial information in areas with difficult access (Herold *et al.*, 2011). Since the last decade, the estimation of forest variable has evolved from an activity based mainly on field forest inventories to an endeavor assisted by remote sensing (Miranda-Aragón *et al.*, 2013; Asner and Mascaro, 2014).

Ongoing progress in the improvement of the capacities of the various types of sensors provides an opportunity to develop analysis techniques to maximize the capabilities of the available satellite platforms.

The estimation of biophysical parameters (measured in forest inventories) is based on remote sensing, which comprises both statistical and physical methods (Häme *et al.*, 2013). The former use estimates under the assumption of a good statistical correlation between the satellite data and the variables of interest (Aguirre-Salado *et al.*, 2012a; Song, 2013; Wulder *et al.*, 2014). The latter consist in carrying out direct measurements in the field and using these as auxiliary variables in the estimation procedures (GOFC-GOLD, 2011).

The improvement of the platforms and sensors in terms of spatial, temporal and radiometric resolution (Roy *et al.*, 2014) as well as free access to the satellite databases (Woodcock *et al.*, 2008) has made possible to exponentially increase research based on biophysical information obtained from multispectral satellite images in the last few years (Wulder *et al.*, 2008; 2012). Access to high spatial resolution satellite images (e.g. *Quickbird*®, *Geoeye*®) enables new options for the indirect estimation of the biophysical characteristics of the trees, whereby the cost of estimating them based on traditional inventories is minimized (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

In Mexico, the use of satellite technology has focused on the detection of changes in the tree cover (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006; Aguirre-Salado *et al.*, 2012; Gebhardt *et al.*, 2014), and forest management monitoring has been directed primarily at such variables as basal area, biomass (Aguirre-Salado *et al.*, 2014), and, secondly, at the estimation of the standing volume and certain important dasometric variables for forest management, such as diameter at breast height and total height.



En este trabajo se evaluó la capacidad de dos plataformas satelitales: *SPOT* (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*, por sus siglas en francés) y *Quickbird*[®], en la estimación de parámetros forestales de interés (i.e. biomasa aérea/carbono, diámetro normal, altura total). Los satélites utilizados presentan diferentes resoluciones, radiométrica y espacial, por lo que se comparó la precisión de las estimaciones contra datos de campo con el objetivo de validar el uso de imágenes satelitales de muy alta resolución (*Quickbird*) para la estimación de parámetros forestales, en comparación con otro sensor de menor resolución espacial (*SPOT*).

Materiales y Métodos

Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio San José del Rincón, al noroeste del Estado de México, en el predio La Sabaneta (Figura 1), cuyas coordenadas son 19°29' y 19°47' latitud norte; meridianos 100°01' y 100°16' longitud oeste. Comprende una superficie de 16 826 ha. Predomina el tipo de clima semifrío, subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, con una temperatura media anual de 10 a 14 °C. La precipitación mínima anual es de 800 y la máxima de 1 000 mm. El predio está bajo manejo forestal, se aprovechan comercialmente dos especies: *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et* Cham. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. También se han registrado otras especies tales como *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Quercus rugosa* Née y *Prunus* sp. (Probosque, 2010).

The present research assessed the capacity of two satellite platforms -*SPOT* (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*, French acronym) and *Quickbird*[®]- in the estimation of forest parameters of interest (i.e. aboveground biomass/aboveground carbon, diameter at breast height, total height). The satellites utilized have different radiometric and spatial resolutions; therefore, the accuracy of the estimates was compared with field data to validate the use of extremely high-resolution satellite images (*Quickbird*) for the estimation of forest parameters, compared to another sensor with a lower spatial resolution (*SPOT*).

Materials and Methods

Location of the study area

The study area is located in the municipality of *San José del Rincón*, northwest of the State of Mexico, in the plot named *La Sabaneta* (Figure 1), between the coordinates 19°29' and 19°47' N, and 100°01' and 100°16' W. It comprises a surface area of 16 826 has. Its climate is predominantly sub-humid, semi-cold, with rains in the summer, when it becomes more humid, and with a mean annual temperature of 10 to 14 °C. The annual minimum precipitation is 800 mm, and the maximum is 1 000 mm. The plot is under forest management; two species are commercially exploited: *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et* Cham. and *Pinus pseudostrabus* Lindl. Other species such as *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Quercus rugosa* Née and *Prunus* sp. have also been cited (Probosque, 2010).

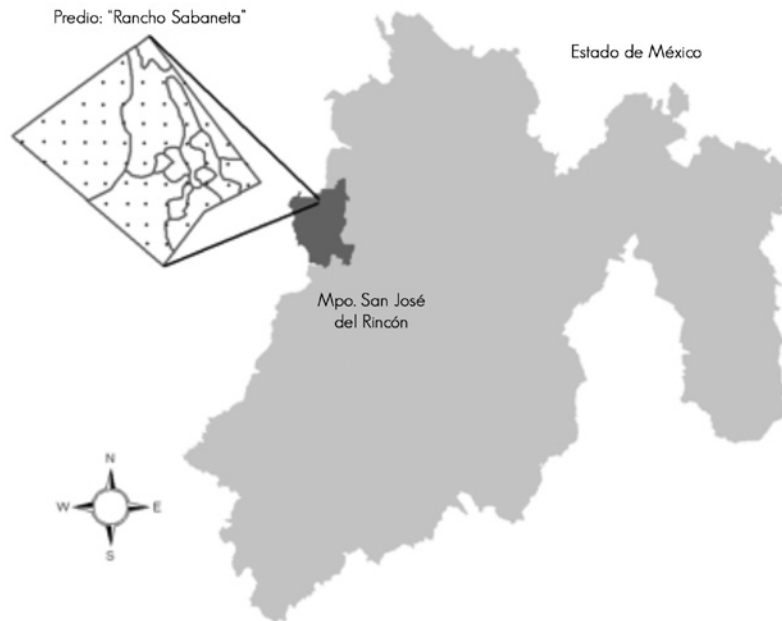


Figura 1. Localización del área de estudio.
Figure 1. Localization of the study area.

Datos de inventario

Se obtuvieron variables dasométricas en 64 sitios de muestreo de 1 000 m² distribuidos sistemáticamente en 12 rodales (Figura 2). En cada unidad de muestreo se registraron las siguientes características: tipo de vegetación, condición, pendiente (%), cobertura (%), exposición, altitud (msnm), coordenada central, número de árboles por sitio, especie, diámetro normal (cm), altura total (m) y edad (años). El diseño utilizado se basó en una red de sitios de muestreo con equidistancias de 400 m² (Figura 2).

Inventory data

Dasometric variables were estimated at sixty-four 1 000m² sampling sites systematically distributed in 12 stands (Figure 2). The following characteristics were registered for each sampling unit: vegetation type, condition, slope (%), cover (%), exposure, altitude (masl), central coordinate, number of trees per site, species, diameter at breast height (cm), total height (m) and age (years). The design used was based on a network of sampling sites at equal distances of 400 m² (Figure 2).

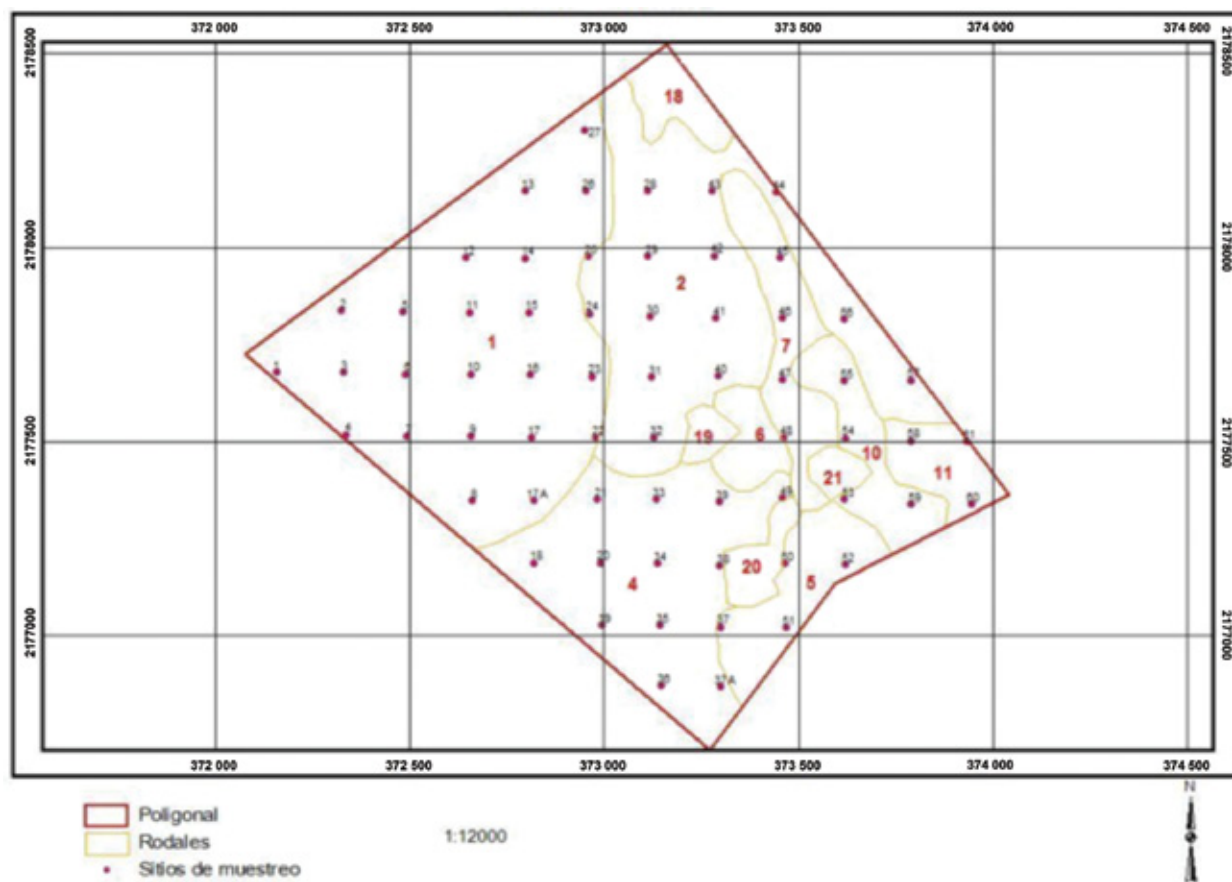


Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo.
 Figure 2. Distribution of the sampling sites.

En la estimación de biomasa/carbono por sitio de muestreo, se utilizaron ecuaciones alométricas de las especies presentes (Cuadro 1). Los valores individuales de carbono se sumaron para obtener valores totales por unidad de muestreo.

In the estimation of the biomass/carbon per sampling site, allometric equations of the occurring species were applied (Table 1). The individual carbon values were added to obtain the totals per sampling unit.



Cuadro 1. Ecuaciones alométricas utilizadas en este estudio.

Especie	Estimación de Carbono	Autor
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schtdl. et Cham.	$0.033 \cdot DN^{2.51}$	Avendaño <i>et al.</i> , 2009
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	$376376 \cdot DN^{1.7317} \cdot H^{1.2239}$	Velasco <i>et al.</i> , 2012
<i>Alnus</i> sp.	$0.11765 \cdot DN^{2.23}$	Acosta <i>et al.</i> , 2002
<i>Cupressus</i> sp.	$0.2639 \cdot DN^2$	Virgil, 2010 (citado por Carrillo <i>et al.</i> , 2014)
<i>Quercus</i> sp.	$e^{(-2.27+2.39 \cdot \text{Log}(DN))} \cdot 0.5$	Ayala <i>et al.</i> , 2001

DN = Diámetro normal; H = Altura total.

Table 1. Allometric equations utilized in this study.

Species	Carbon estimate	Author
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schtdl. et Cham.	$0.033 \cdot DBH^{2.51}$	Avendaño <i>et al.</i> , 2009
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	$376376 \cdot DBH^{1.7317} \cdot H^{1.2239}$	Velasco <i>et al.</i> , 2012
<i>Alnus</i> sp.	$0.11765 \cdot DBH^{2.23}$	Acosta <i>et al.</i> , 2002
<i>Cupressus</i> sp.	$0.2639 \cdot DBH^2$	Virgil, 2010 (cited by Carrillo <i>et al.</i> , 2014)
<i>Quercus</i> sp.	$e^{(-2.27+2.39 \cdot \text{Log}(DBH))} \cdot 0.5$	Ayala <i>et al.</i> , 2001

DBH= Diameter at breast height; H= Total height.

Imágenes satelitales y preprocesamiento

Se obtuvo una imagen SPOT 5 HRG de la estación de recepción México, a través del convenio de colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y Estación de Recepción México (ERMEX). La imagen fue adquirida el 1 de abril de 2009 con nivel de procesamiento 2A. La imagen Quickbird fue donada por la empresa Merrick® México con fecha de toma 6 de marzo de 2009. Ambas imágenes se georreferenciaron al sistema UTM zona 14 N con Datum WGS84 (Figura 3).

Satellite images and pre-processing

A SPOT 5 HRG image was obtained from the Mexico Receiving Station through the collaboration agreement with the National Institute for Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) and Mexico Receiving Station (ERMEX). The date when the SPOT image was taken is April 1, 2009, with a 2A processing level. The Quickbird image was donated by Merrick® Mexico and was taken on March 6, 2009. Both images were georeferenced to UTM zone 14 N, using Datum WGS84 (Figure 3).

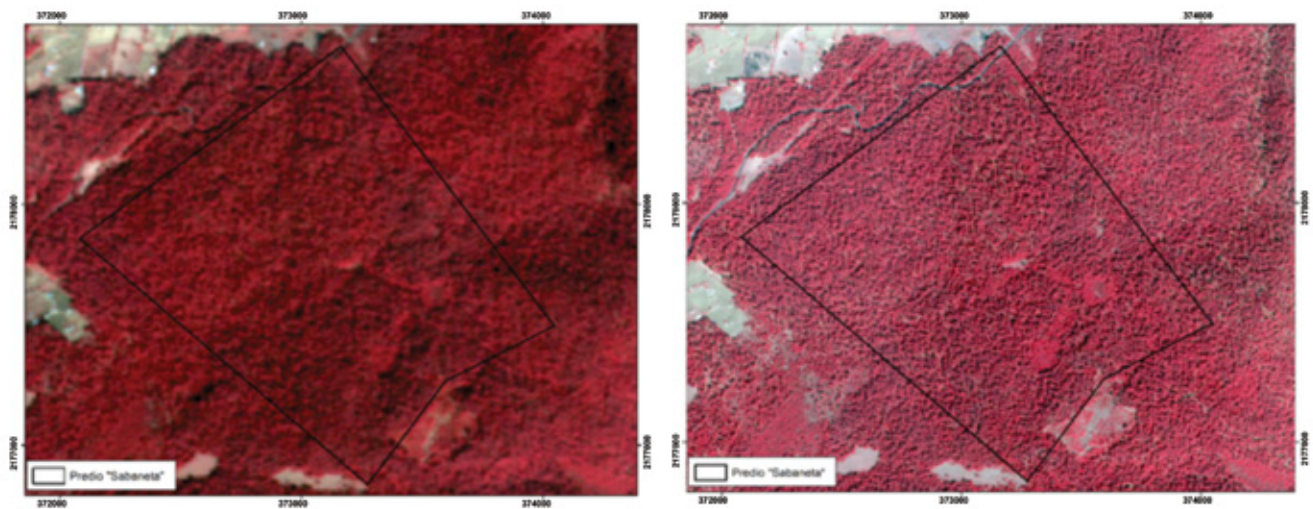


Figura 3. Imágenes satelitales SPOT (izquierda) y Quickbird (derecha) en falso color; bandas infrarrojo cercano, rojo y verde.
Figure 3. False color SPOT (left) y Quickbird (right) satellite images; red and green near infrared bands.

Las imágenes de satélite recibieron un preprocesamiento antes de utilizarlas para la extracción de información espectral. La imagen SPOT fue corregida a la Quickbird para asegurar correspondencia espacial; las dos se transformaron a radianza (Krause, 2005; Soudani et al., 2006) y reflectancia exoatmosférica (Thenkabail et al., 2004). Además, se corrigieron atmosféricamente utilizando el modelo Cost propuesto por Chávez (1996) para obtener la reflectancia superficial.

Índices espectrales de vegetación y extracción de valores espectrales

Los índices de vegetación (IV) son combinaciones de mediciones de reflectancia, sensibles a los efectos combinados de la concentración de clorofila en el follaje, área foliar y arquitectura del dosel. Los IV están diseñados para proveer una medida del estado de la vegetación y, aunque poseen algunas limitaciones (Romero-Sánchez et al., 2009), han sido usados en muchas aplicaciones, incluso para la estimación de biomasa/carbón aéreo (Avitabile et al., 2012).

Después de una revisión de literatura, se seleccionaron índices de vegetación que han sido citados para estimar parámetros forestales (Cuadro 2), los cuales se aplicarán en este trabajo.

The satellite images were pre-processed before being utilized to extract spectral information. The SPOT image was coregistered to the Quickbird image to ensure spatial correspondence. Both images were transformed into radiance values (Krause, 2005; Soudani et al., 2006) and exoatmospheric reflectance (Thenkabail et al., 2004). Furthermore, they were atmospherically corrected using the Cost model proposed by Chávez (1996) to obtain the surface reflectance.

Spectral vegetation indices and extraction of spectral values

The vegetation indices (VIs) are combinations of reflectance measurements that are sensitive to the combined effects of the concentration of chlorophyll in the foliage, foliar areas and canopy architecture. VIs are designed to provide a measure of the status of the vegetation, and although some have certain limitations (Romero-Sánchez et al., 2009), they have been used in many applications, even for purposes of estimating biomass/aboveground carbon (Avitabile et al., 2012).

After reviewing the literature, documented vegetation indices were selected to estimate forest parameters (Table 2) and were applied in the present study.



Cuadro 2. Información espectral utilizada en el presente estudio.

Índice de vegetación	Ecuación	Fuente
Bandas espectrales	Verde, Rojo, Infrarrojo cercano, Infrarrojo medio	Aguirre-Salado et al., 2012a
Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI)	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse et al., 1974
Índice de vegetación de diferencias normalizadas modificado para SPOT: Infrarrojo medio-verde (NDV41), Infrarrojo medio-Rojo (NDVI42), Infrarrojo medio-Infrarrojo cercano (NDVI43), Rojo-Infrarrojo cercano (NDVI23)	$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$	
Índice de vegetación de diferencias normalizada modificado para Quickbird: Infrarrojo cercano-azul (NDV41), Infrarrojo cercano-verde (NDVI42), Infrarrojo medio-Infrarrojo cercano (NDVI43), Rojo-Infrarrojo cercano (NDVI23)	$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$	
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$\frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + R + L}$	Huete, 1988
Índice verde de Vegetación (GVI)	$\frac{\text{Infrarrojo cercano}}{\text{verde}}$	Rao y Mohankumar, 1994
Índice de vegetación transformado (TVI)	$\sqrt{\frac{NIR - R}{NIR + R}} + 0.5$	Deering et al., 1975
Índice Ka (Infrarrojo cercano y Rojo)	$\frac{(VD_b)}{(Spi)(E_{T_i})} \quad i = 1, \dots, n$	Luévano et al., 2006

Table 2. Spectral information utilized in the present study.

Vegetation index	Equation	Source
Spectral bands	Green, Red, Near infrared, Medium infrared	Aguirre-Salado <i>et al.</i> , 2012
Normalized difference vegetation indices (NDVI)	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
Modified normalized difference vegetation index for SPOT: Medium infrared-green (NDV41), Medium infrared-Red (NDV42), Medium infrared-Near infrared (NDV43), Red-Near infrared (NDV123)	$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$	
Modified normalized difference vegetation index for Quickbird: Near infrared-blue (NDV41), Near infrared-green (NDV42), Medium infrared-Near infrared (NDV43), Red-Near infrared(NDV123)	$\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$	
Soil-adjusted vegetation index (SAVI)	$\frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + R + L}$	Huete, 1988
Green vegetation index (GVI)	$\frac{\text{Infrarrojo cercano}}{\text{verde}}$	Rao and Mohankumar, 1994
Transformed vegetation index (TVI)	$\sqrt{\frac{NIR - R}{NIR + R}} + 0.5$	Deering <i>et al.</i> , 1975
Ka index (Near infrared and Red)	$\frac{(VD_i)}{(Spi)(E_{\lambda_i})} \quad i = 1, \dots, n$	Luévano <i>et al.</i> , 2006,

Se calcularon los índices de vegetación señalados en cada imagen para realzar rasgos de interés y, posteriormente, usarlos como variables dependientes en modelos de regresión.

Para ambas imágenes, los valores espectrales fueron extraídos de dos maneras: a) valores espectrales centrales de cada sitio, y b) valores espectrales promedio de cada sitio de muestreo. Adicionalmente, se extrajeron valores espectrales de 30 sitios sin cobertura para cada imagen y se agregaron a la base de datos.

Clasificación supervisada

Con la finalidad de determinar la cobertura forestal en la zona, se realizó una clasificación supervisada con la imagen *Quickbird*. Esta se clasificó en tres categorías: bosque, no bosque y sombras, para ello se empleó el programa ERDAS *Imagine*® 2010, versión 10.1. En total se obtuvieron 30 firmas espectrales: 10 para bosque, 10 para no bosque y 10 para sombras. La clasificación de la parte boscosa, se hizo ajustándose al área que comprendieron los 64 sitios de muestreo.

The vegetation indices indicated in each image were calculated to highlight traits of interest and, subsequently, use these as dependent variables in regression models.

For both images, the spectral values were extracted in two different ways: a) central spectral values of each site, and b) average spectral values for each sampling site. Also, spectral values of 30 sites without cover were extracted for each image and added to the database.

Supervised classification

To determine the forest cover of the area, a supervised classification was carried out with the *Quickbird* image. Classification was divided into three categories -forest, non-forest and shades-, using the ERDAS software 2010, version 10.1, by *Imagine*®. A total of 30 spectral signatures were defined: 10 for the forest, 10 for non-forest, and 10 for shades. The classification of the forest part was adjusted to the area comprising the 64 sampling sites.



Clasificación orientada a objetos

La misma imagen se procesó con una aplicación de segmentación de multirresolución, la cual se encarga de fragmentarla en regiones multipíxel homogéneas basadas en varios parámetros definidos por el usuario. Lo anterior puede influenciar el resultado del proceso de segmentación, a través de la especificación y ponderación de los datos de entrada (Blaschke, 2010).

El algoritmo de segmentación se describe como una técnica de fusión de las regiones en la que los píxeles individuales se conglomeran en objetos pequeños (Figura 4), seguido por iteraciones sucesivas en que los objetos pequeños se fusionan gradualmente en objetos más grandes; de tal manera que, la heterogeneidad entre los objetos de la imagen resultante se minimiza (Chubey *et al.*, 2006).

Object-oriented classification

The same image was processed with a multiresolution segmentation application, which broke it up into homogeneous multipixel regions based on user-defined parameters. This process may influence the result of the segmentation process through specification and weighting of the input data (Blaschke, 2010).

The segmentation algorithm is described as a technique for the fusion of those regions in which the individual pixels cluster into small objects (Figure 4), followed by successive iterations in which small objects gradually fuse into larger objects, so that the heterogeneity among the objects of the resulting image is minimized (Chubey *et al.*, 2006).

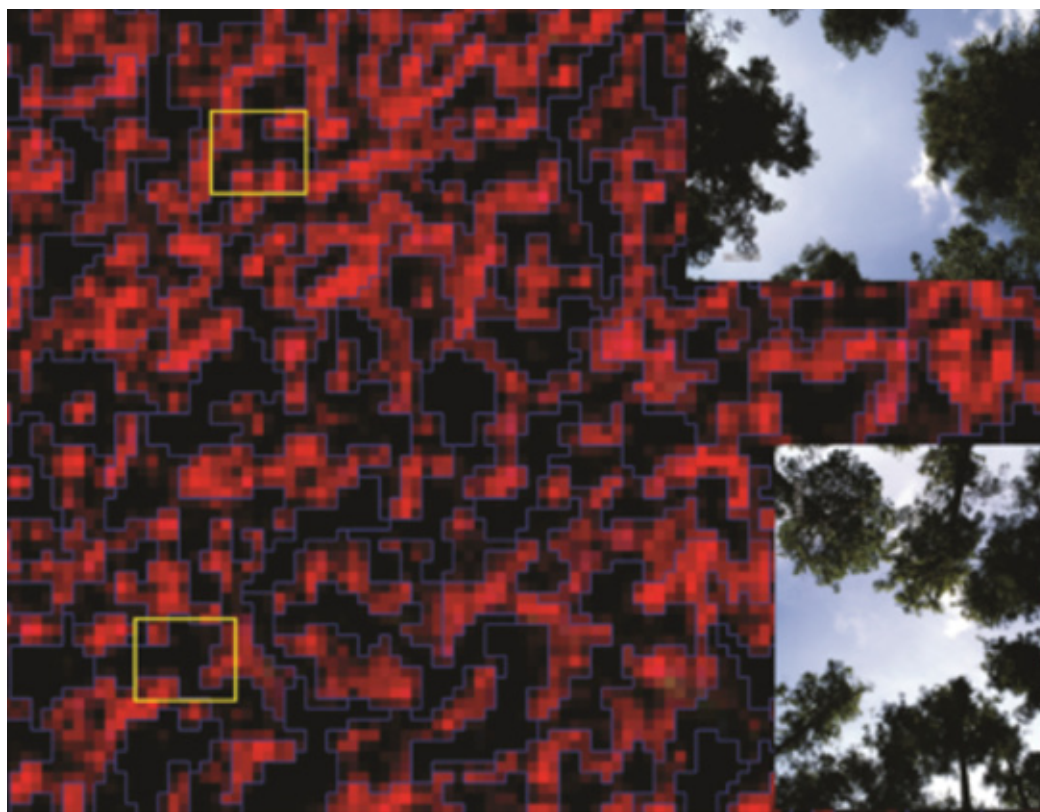


Figura 4. Parte del proceso de clasificación orientada a objetos.

Figure 4. Object-oriented classification process.

Los valores de cobertura obtenidos por sitio se adicionaron también a la base de datos. La validación de la precisión en las clasificaciones, en ambos casos, se llevó a cabo mediante el cálculo del índice Kappa y la matriz de exactitud promedio (Congalton y Kass, 2009), con datos de campo independientes al inventario forestal descrito anteriormente.

The values of the cover per site were also entered in the database. The accuracy of the classifications in both cases was validated by estimating the kappa index and the overall accuracy matrix (Congalton and Kass, 2009), with field data independent from the forest inventory described above.

Relación de las variables forestales y espectrales

Pruebas de correlación. Inicialmente se realizó un análisis de correlación de Pearson ($r; \alpha_{0.05}$) entre los parámetros forestales de densidad y la respuesta espectral captada en los píxeles de la imagen, a través de los índices de vegetación para determinar el grado de asociación entre las variables evaluadas.

Análisis de regresión (paramétrico). Mediante análisis de regresión se determinó el tipo de relación existente entre los datos espectrales provenientes de la imagen satelital y las variables respuesta de interés. Las variables dependientes incluyeron parámetros de densidad forestal: Carbono total (Mg/sitio); diámetro normal promedio (cm); y altura total (m). Las variables independientes fueron los valores espectrales por banda y sus transformaciones matemáticas (índices de vegetación) y la variable respuesta de acuerdo a lo sugerido por Zheng *et al.* (2004) y Aguirre-Salado *et al.* (2009).

Se utilizó el procedimiento de regresión *stepwise* para identificar a las variables que predicen mejor las variables de interés. El modelo utilizado fue de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Donde:

- y = Parámetro forestal por estimar
- X_n = Bandas espectrales, Índices de Vegetación, Cobertura de Copa
- β_n = Coeficientes de regresión
- ε = Error aleatorio

La construcción de los modelos de regresión utilizó 85 % de la base de datos de inventario, mientras que 15 % restante se usó para la validación de los modelos. Como indicadores de ajuste se emplearon los coeficientes de determinación (R^2). Además, para evaluar la capacidad predictiva de los modelos se calculó la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la raíz del error cuadrático medio relativo (RECM %). Para todos los parámetros se estimaron límites de confianza a 95 % (Kutner *et al.*, 2004).

La estimación de las variables forestales en el área de estudio se realizó multiplicando las ponderaciones o coeficientes obtenidos de las ecuaciones de cada banda espectral o VI, para obtener la estimación espacialmente explícita de la variable de interés.

Correlation between the forest and spectral variables

Correlation tests. A Pearson's analysis ($r; \alpha_{0.05}$) of the correlation between the forest density parameters and the spectral response captured in the pixels of the image was carried out using the vegetation indexes to determine the degree of association between the evaluated variables.

(Parametric) Regression analysis. The type of relationship existing between the spectral data from the satellite image and the response variables of interest was determined. The dependent variables included forest density parameters: total carbon (Mg/site); mean diameter at breast height (cm) and total height (m). The independent variables were the spectral values per band and their mathematical transformations (vegetation indices), and the response variable was the parameter of interest, as suggested by Zheng *et al.* (2004) and Aguirre-Salado *et al.* (2009).

The stepwise regression procedure was utilized to identify the variables that best predict the variables of interest. The model was as follows:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon;$$

Where:

- y = Forest parameter to be estimated
- X_n = Spectral bands, Vegetation indices, Crown cover
- β_n = Regression coefficients
- ε = Random error

The construction of the regression model took 85 % of the inventory database, while the remaining 15 % was used to validate the models. The adjustment indicators were the determination coefficients (R^2). Furthermore, the predictive capacity of the models was assessed by calculating the root mean square error (RMSE) and the relative root mean square error (RRMSE). 95 % confidence intervals were estimated for all the parameters (Kutner *et al.*, 2004).

The forest variables in the study area were estimated by multiplying the weightings or coefficients calculated based on the equations of each spectral band or VI, to obtain the spatially explicit estimate of the variable of interest.



Resultados y Discusión

Las imágenes satelitales clasificadas permitieron discriminar los distintos elementos en la imagen, agrupados principalmente en tres categorías: Bosque, No bosque y Sombra (Figura 5). De acuerdo al proceso de validación de las clasificaciones; el índice Kappa estuvo arriba de 0.96 en todos los casos, mientras que la exactitud promedio arrojó valores superiores a 95 %. A partir de la clasificación se aislaron píxeles de bosque para utilizarlos en el cálculo de los promedios de valores espectrales al interior de la parcela de muestreo.

Results and Discussion

The classified satellite images enabled discrimination between the various elements in the image, grouped mainly into three categories: forest, non-forest and shade (Figure 5). According to the process for the validation of the classifications, the Kappa index was above 0.96 in all cases, while the overall accuracy yielded values above 95 %. Based on the classification, the forest pixels were isolated and used to calculate the mean spectral values within the sampling plot.

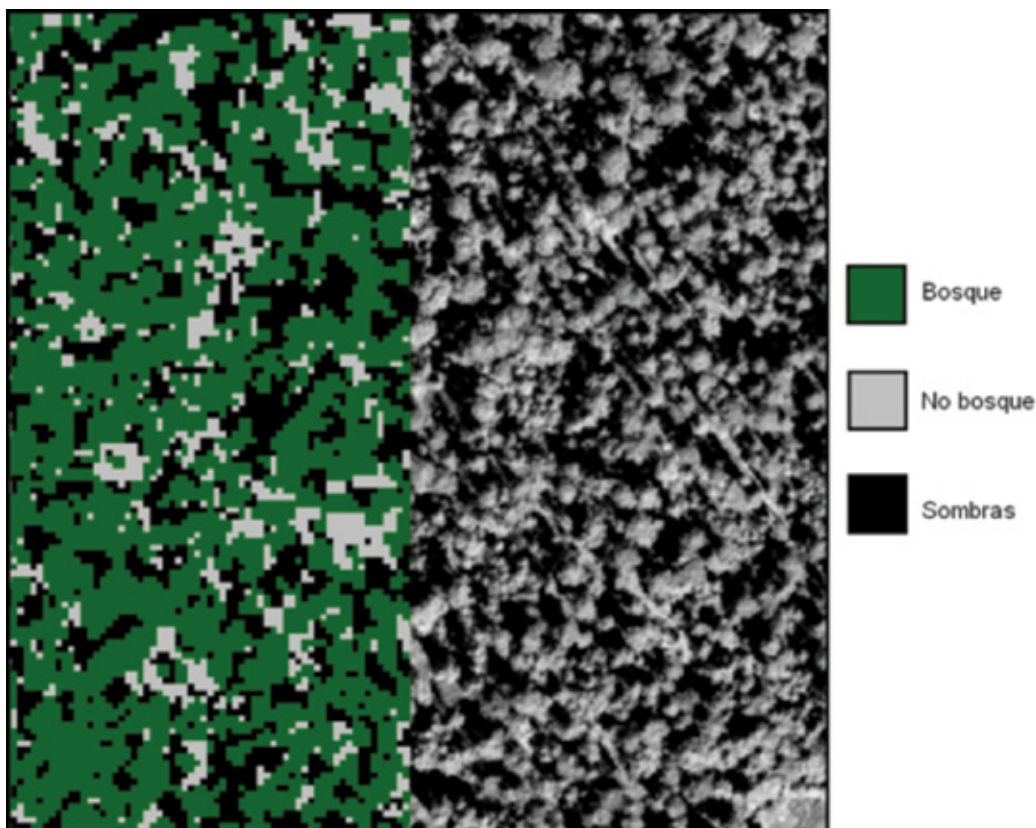


Figura 5. Categorías clasificadas en las imágenes satelitales.
Figure 5. Classified categories in the satellite images.

Pruebas de correlación

En los cuadros 3 y 4 se resumen los valores estimados de las correlaciones para las imágenes *SPOT* y *Quickbird*, respectivamente. Se observa, en el caso de la imagen *SPOT*, que los índices espectrales asociados a la región del infrarrojo (B_3) mostraron correlaciones relativamente altas (>0.50 , $\alpha=0.05$) con los valores de carbono aéreo, lo cual es congruente con registros hechos para bosques templados (Aguirre-Salado *et al.*, 2009). Sin embargo, en el caso de *SPOT*, algunas de las correlaciones más altas se presentaron en la región del verde (B_1). El diámetro normal y altura tuvieron correlaciones altas en

Correlation tests

Tables 3 and 4 summarize the estimated values of the correlations for the *SPOT* and *Quickbird* images, respectively. In the case of the *SPOT* image, the spectral indices to be associated with the infrared region (B_3) were observed to show relatively high correlations (>0.50 , $\alpha=0.05$) with the aboveground carbon values, consistently with the existing records for the temperate forests (Aguirre-Salado *et al.*, 2009). However, in the case of *SPOT*, some of the highest correlations occurred in the green region (B_1). The diameter at breast height and height had high

la mayoría de los valores extraídos de la imagen, tanto para valor central como valor promedio de la parcela.

correlations in most of the values extracted from the image, for both the central and mean values of the plot.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación imagen SPOT.

	Variable	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	NDVI	TVI	NDVI ₂₃	NDVI ₄₁	NDVI ₄₂	NDVI ₄₃	IK _R	IK _{RC}	CC
Valor central de la parcela	C	-0.55	-0.55	-0.49	-0.20	0.45	0.34	-0.45	-0.21	0.12	-0.26	0.37	0.33	0.52
	DN	-0.67	-0.67	-0.60	-0.43	0.55	0.41	-0.55	-0.43	-0.05	-0.46	0.69	0.64	0.64
	ALT	-0.76	-0.76	-0.61	-0.48	0.66	0.51	-0.66	-0.46	-0.03	-0.53	0.68	0.65	0.72
Valor promedio de la parcela	C	-0.55	-0.55	-0.52	-0.56	0.48	0.39	-0.48	-0.56	-0.31	-0.54	0.37	0.32	0.52
	DN	-0.66	-0.67	-0.58	-0.67	0.62	0.54	-0.62	-0.63	-0.28	-0.66	0.69	0.66	0.64
	ALT	-0.75	-0.75	-0.61	-0.75	0.72	0.63	-0.72	-0.69	-0.26	-0.75	0.69	0.67	0.72

C = Carbono total; DN = Diámetro normal; ALT = Altura total; B_n = Reflectancias de cada banda; NDVI, GARI, TVI, NDVI₂₃, NDVI₄₁, NDVI₄₂, IK_R, IK_{RC} = Índices de vegetación; CC = Cobertura de copa.

Table 3. Correlation coefficients in the spot SPOT image.

	Variable	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	NDVI	TVI	NDVI ₂₃	NDVI ₄₁	NDVI ₄₂	NDVI ₄₃	IK _R	IK _{RC}	CC
Central value of the plot	C	-0.55	-0.55	-0.49	-0.20	0.45	0.34	-0.45	-0.21	0.12	-0.26	0.37	0.33	0.52
	DBH	-0.67	-0.67	-0.60	-0.43	0.55	0.41	-0.55	-0.43	-0.05	-0.46	0.69	0.64	0.64
	ALT	-0.76	-0.76	-0.61	-0.48	0.66	0.51	-0.66	-0.46	-0.03	-0.53	0.68	0.65	0.72
Mean value of the plot	C	-0.55	-0.55	-0.52	-0.56	0.48	0.39	-0.48	-0.56	-0.31	-0.54	0.37	0.32	0.52
	DBH	-0.66	-0.67	-0.58	-0.67	0.62	0.54	-0.62	-0.63	-0.28	-0.66	0.69	0.66	0.64
	H	-0.75	-0.75	-0.61	-0.75	0.72	0.63	-0.72	-0.69	-0.26	-0.75	0.69	0.67	0.72

C = Total carbon; DBH = Diameter at breast height; H = Total height; B_n = Reflectances of each band; NDVI, GARI, TVI, NDVI₂₃, NDVI₄₁, NDVI₄₂, IK_R, IK_{RC} = Vegetation indices; CC = Crown cover.

En la imagen *Quickbird* (Cuadro 4), los parámetros que registraron coeficientes de correlación altos (> 0.6), fueron las bandas azul, verde, roja y la mayoría de los índices espectrales asociados a la región infrarroja del espectro electromagnético.

In the *Quickbird* image (Table 4), the parameters with high correlation coefficients (> 0.6) were the blue, green and red bands, and most spectral indices associated with the infrared region of the electromagnetic spectrum.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación imagen *Quickbird*.

	Variable	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	NDVI	TVI	NDVI ₂₃	NDVI ₄₁	NDVI ₄₂	NDVI ₄₃	IK _R	IK _{RC}	CC
Valor central de la parcela	C	-0.58	-0.57	-0.60	-0.02	0.64	-0.58	-0.64	0.50	0.60	0.43	0.42	0.55	0.59
	DN	-0.70	-0.69	-0.70	-0.14	0.71	-0.75	-0.71	0.51	0.65	0.75	0.72	0.58	0.71
	ALT	-0.75	-0.74	-0.75	-0.11	0.77	-0.77	-0.77	0.58	0.72	0.76	0.74	0.66	0.77
Valor promedio de la parcela	C	-0.60	-0.62	-0.64	-0.37	0.66	-0.72	-0.67	0.43	0.61	0.53	0.52	-0.36	0.68
	DN	-0.68	-0.71	-0.74	-0.40	0.77	-0.81	-0.78	0.51	0.71	0.79	0.78	-0.39	0.78
	ALT	-0.75	-0.77	-0.80	-0.44	0.83	-0.87	-0.84	0.56	0.77	0.78	0.77	-0.39	0.84

C = Carbono total; DN = Diámetro normal; ALT = Altura total; B_n = Reflectancias de cada banda; NDVI, GARI, TVI, NDVI₂₃, NDVI₄₁, NDVI₄₂, IK_R, IK_{RC} = Índices de vegetación; CC = Cobertura de copa.



Table 4. Correlation coefficients in the Quickbird image.

	Variable	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	NDVI	TVI	NDVI ₂₃	NDVI ₄₁	NDVI ₄₂	NDVI ₄₃	IK _R	IK _{RC}	CC
Central value of the plot	C	-0.58	-0.57	-0.60	-0.02	0.64	-0.58	-0.64	0.50	0.60	0.43	0.42	0.55	0.59
	DBH	-0.70	-0.69	-0.70	-0.14	0.71	-0.75	-0.71	0.51	0.65	0.75	0.72	0.58	0.71
	H	-0.75	-0.74	-0.75	-0.11	0.77	-0.77	-0.77	0.58	0.72	0.76	0.74	0.66	0.77
Mean value of the plot	C	-0.60	-0.62	-0.64	-0.37	0.66	-0.72	-0.67	0.43	0.61	0.53	0.52	-0.36	0.68
	DBH	-0.68	-0.71	-0.74	-0.40	0.77	-0.81	-0.78	0.51	0.71	0.79	0.78	-0.39	0.78
	H	-0.75	-0.77	-0.80	-0.44	0.83	-0.87	-0.84	0.56	0.77	0.78	0.77	-0.39	0.84

C = Total carbon; DBH = Diameter at breast height; H = Total height; B_n = Reflectances of each band; NDVI, GARI, TVI, NDVI₂₃, NDVI₄₁, NDVI₄₂, IK_R, IK_{RC} = Vegetation indices; CC = Crown cover.

La correlación negativa obtenida para los parámetros forestales contra las reflectancias y algunos índices de vegetación de este trabajo concuerdan con lo indicado por Hall *et al.* (2006) y Aguirre-Salado *et al.* (2009), quienes explican que dicha correlación por la disminución del albedo en zonas con vegetación densa y cerrada. Esta correlación negativa se acentuó en la banda 4 (Infrarroja) de la imagen SPOT 5 HRG (-0.60 a -0.75), y en la banda 3 (Roja) de la imagen Quickbird (-0.58 a -0.80).

The negative correlation for the forest parameters against the reflectances and certain vegetation indices of this work agree with the findings of Hall *et al.* (2006) and Aguirre-Salado *et al.* (2009), who explain this correlation by the reduction of the albedo in areas with dense, closed vegetation. This negative correlation was increased in band 4 (Infrared) of the SPOT 5 HRG image (-0.60 to -0.75), and in band 3 (Red) of the Quickbird image (-0.58 to -0.80).

Análisis de regresión

En el Cuadro 5 se muestran los diferentes modelos de regresión obtenidos mediante el análisis de regresión *stepwise*, a partir de los valores espectrales de la imagen SPOT 5 HRG y las coberturas.

Regression analysis

Table 5 shows the different models of regression obtained by means of the stepwise regression analysis, based on the spectral values of the SPOT 5 HRG image and the covers.

Cuadro 5. Modelos de regresión obtenidos mediante la regresión *stepwise*, para la imagen SPOT 5 HRG.

	Variable	Modelo	R ² ajustada
Valor central de la parcela	C	(1) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(IK_R) + \beta_3(IK_{RC})$	0.56
	DN	(4) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(IK_R) + \beta_3(IK_{RC})$	0.92
	ALT	(5) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(NDVI_{41}) + \beta_4(NDVI_{42}) + \beta_5(IK_R) + \beta_6(IK_{RC})$	0.95
Valor promedio de la parcela	C	$-0.11 + 2.31(CC) + 23.46(B_3) - 29.28(B_4) + 7.19(NDVI_{41}) - 100.34(IK_{RC})$	0.79
	DN	$32.32 - 203.34(TVI) - 526.93(NDVI_{23}) - 377.79(NDVI_{42}) + 340.94(NDVI_{43}) + 974.65(IK_R)$	0.86
	ALT	$47.84 - 305.2(TVI) - 453.74(NDVI_{23}) + 71.03(NDVI_{41}) - 313.72(NDVI_{42}) + 213.7(NDVI_{43}) + 1710.8(IK_{RC})$	0.93

C = Carbono total; DN = Diámetro normal; ALT = Altura total; B_n = Reflectancias.



Table 5. Regression models obtained through stepwise regression, for the SPOT 5 HRG image.

	Variable	Model	Adjusted R ²
Central value of the plot	C	(1) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(IK_R) + \beta_3(IK_{RC})$	0.56
	DBH	(4) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(IK_R) + \beta_3(IK_{RC})$	0.92
	H	(5) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(NDVI_{41}) + \beta_4(NDVI_{42}) + \beta_5(IK_R) + \beta_6(IK_{RC})$	0.95
Mean value of the plot	C	$-0.11 + 2.31(CC) + 23.46(B_3) - 29.28(B_4) + 7.19(NDVI_{41}) - 100.34(IK_{RC})$	0.79
	DBH	$32.32 - 203.34(TVI) - 526.93(NDVI_{23}) - 377.79(NDVI_{42}) + 340.94(NDVI_{43}) + 9774.65(IK_R)$	0.86
	H	$47.84 - 305.2(TVI) - 453.74(NDVI_{23}) + 71.03(NDVI_{41}) - 313.72(NDVI_{42}) + 213.7(NDVI_{43}) + 1710.8(IK_{RC})$	0.93

C = Total carbon; DBH = Diameter at breast height; H = Total height; B_n = Reflectances.

Se aprecia que las variables predictivas más comunes, para la mayoría de los parámetros forestales, fueron la cobertura de copa, algunos NDVI y los índices K. Los modelos con el coeficiente de determinación más alto correspondieron a los de diámetro normal y altura, tanto para los valores centrales como para los valores promedio de la parcela.

En el Cuadro 6 se observan los modelos de regresión obtenidos para la imagen *Quickbird*, en los que, de manera similar, las variables predictivas más comunes fueron: la clasificación orientada a objetos, las reflectancias, algunos NDV y los índices K. Los modelos de diámetro normal y altura total resultaron con los coeficientes de determinación más altos.

The most common predictive variables for most forest parameters were the crown cover, certain NDVIs and the K indices. The models with the highest determination coefficient corresponded to the diameter at breast height and height, for both the mean and central values of the plot.

Table 6 shows the regression models obtained for the *Quickbird* image, in which the most common predictive values were, similarly: object-oriented classification, reflectances, certain NDVIs and the K indices. The models of diameter at breast height and total height had the highest determination coefficients.

Cuadro 6. Modelos de regresión obtenidos mediante la regresión *Stepwise*, para la imagen *Quickbird*.

	Variable	Modelo	R ² ajustada
Valor central de la parcela	C	(11) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_3) + \beta_4(NDVI_{42}) + \beta_5(IK_R)$	0.86
	DN	(14) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_3) + \beta_4(NDVI) + \beta_5(NDVI_{41}) + \beta_6(NDVI_{42}) + \beta_7(IK_R)$	0.88
	ALT	(15) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_4) + \beta_4(GARI) + \beta_5(IK_R)$	0.91
Valor promedio de la parcela	C	$5.18 - 76.99(B_2) + 46.06(B_4) - 7.55(GVI)$	0.55
	DN	$2.59 - 494.29(NDVI) - 479.15(NDVI_{23}) + 15.91(IK_R) - 4.91(IK_{RC})$	0.84
	ALT	$-0.91 - 270.64(NDVI) - 275.49(NDVI_{23}) + 10.63(IK_R) - 3.27(IK_{RC})$	0.86

C = Carbono total; DN = Diámetro normal; ALT = Altura total.



Table 6. Regression models obtained using the Stepwise regression, for the Quickbird image.

Variable		Model	Adjusted R ²
Central value of the plot	C	(11) $\beta_0 + \beta_1(CC) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_3) + \beta_4(NDVI_{42}) + \beta_5(IK_R)$	0.86
	DBH	(14) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_3) + \beta_4(NDVI) + \beta_5(NDVI_{41}) + \beta_6(NDVI_{42}) + \beta_7(IK_R)$	0.88
	H	(15) $\beta_0 + \beta_1(B_1) + \beta_2(B_2) + \beta_3(B_4) + \beta_4(GARI) + \beta_5(IK_R)$	0.91
Mean value of the plot	C	5.18 -76.99(B ₂)+46.06(B ₄)-7.55(GVI)	0.55
	DBH	2.59-494.29(NDVI)-479.15(NDVI ₂₃) + 15.91(IK _R)-4.91(IK _{RC})	0.84
	H	-0.91-270.64(NDVI)-2.75.49(NDVI ₂₃)+ 10.63(IKR)-3.27(IK _{RC})	0.86

C = Total carbon; DBH = Diameter at breast height; H = Total height.

En el Cuadro 7 se consignan las estimaciones de carbono aéreo, diámetro normal y altura total para cada una de las imágenes, en las que se usaron los valores promedio de la parcela. Se evidencia que los valores en ambas imágenes son consistentes para las variables carbono aéreo y altura total.

Table 7 lists the estimates of aboveground carbon, diameter at breast height and total height for each of the images in which the mean values of the plot were used. The values for the aboveground carbon and total height variables are visibly consistent in both images.

Cuadro 7. Estimaciones de parámetros forestales por tipo de sensor.

	SPOT				Quickbird			
	Media	IC-	IC+	R ²	Media	IC-	IC+	R ²
C*	3.29	1.69	4.90	0.79	3.02	0.73	5.31	0.55
DN**	26.22	16.01	36.43	0.86	26.71	16.12	37.31	0.84
Altura***	19.54	14.47	24.61	0.93	19.53	12.66	26.40	0.86

* = MgC; ** = Centímetros, *** = Metros.

Table 7. Forest parameter estimations by sensor type.

	SPOT				Quickbird			
	Mean	IC-	IC+	R ²	Media	IC-	IC+	R ²
C*	3.29	1.69	4.90	0.79	3.02	0.73	5.31	0.55
DBH**	26.22	16.01	36.43	0.86	26.71	16.12	37.31	0.84
Height***	19.54	14.47	24.61	0.93	19.53	12.66	26.40	0.86

* = MgC; ** = Centimeters, *** = Meters.

Estimación de error y validación

En el Cuadro 8 se presenta el valor de la raíz del error cuadrático medio que se estimó para cada uno de los modelos utilizados. En el caso del para carbono aéreo, tanto absoluto (Mg) como relativo (%) fue menor a 0.79 y 26 %, respectivamente, para ambas imágenes. Los resultados de este estudio mostraron que es posible estimar parámetros forestales (altura total, diámetro normal, carbono aéreo) con modelos de regresión lineal múltiple. De acuerdo con la generación de las distintas ecuaciones, mediante el procedimiento *stepwise* se observó, para ambas imágenes y tratamientos, (valor central y valor

Error estimation and validation

The root mean square error estimated for each of the utilized models is shown in Table 8. In the case of the aboveground carbon, the root of both the absolute (Mg) and relative (%) error were below 0.79 and 26 %, respectively, for both images. The results of this study proved that it is possible to estimate forest parameters (total height, diameter at breast height, aboveground carbon) with multiple linear regression models. According to the generation of the various equations, using the *stepwise* procedures, the determination coefficients were

promedio de la parcela) que los coeficientes de determinación resultaron aceptables ($R^2 > 0.55$).

Cuadro 8. Estimación del error para cada variable.

Variable	Imagen SPOT 5 HRG		Imagen Quickbird	
	RECM	RECM %	RECM	RECM %
Carbono aéreo	0.78 Mg	23.89	0.77 Mg	25.28
Diámetro Normal	5.15 cm	20.13	10.70 cm	42.49
Altura	2.50 m	12.93	6.29 m	33.24

El error asociado a las estimaciones de carbono aéreo se ubicó dentro del intervalo documentado por otros autores. Por ejemplo, Aguirre-Salado *et al.* (2012b) citan para estimaciones de biomasa aérea un RECM % de 36.81, en modelos lineales en bosques del estado de San Luis Potosí. En otro caso, en el cual se utiliza información derivada de imágenes SPOT para estimar carbono aéreo en bosques de pino se registra un RECM % de 30.16 % (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

Las fuertes relaciones que presentaron los índices de vegetación con los parámetros forestales evaluados, concuerda con lo señalado por otros autores (Franklin, 2001; Mora *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2015); en especial el NDVI, y por consiguiente, de las bandas espectrales (R e IR). El NDVI es considerado un indicador del estado de la vegetación, debido a que se caracteriza por representar un claro contraste entre las regiones correspondientes al rojo visible y al infrarrojo cercano (Franklin, 2001).

Otra de las variables que fue común para la mayoría de los modelos fue el índice K (Luévano *et al.*, 2006). El valor de K se define como el valor espectral de la densidad de los componentes en el pixel, además de tomar en cuenta el valor digital de los pixeles, el número total de especies presentes y el número total de individuos en un área específica que para el interés de este estudio fue de 1 000 m².

Los modelos para estimar diámetro normal y altura total tuvieron coeficientes de determinación altos, para diámetros ($R^2=0.86$ y 0.84) y alturas ($R^2=0.93$ y 0.86) ($p<0.01$) para los sensores SPOT y Quickbird, respectivamente. Los resultados sugieren que, al tener estimaciones confiables de diámetros y alturas, estas se podrían utilizar para aplicarlos en las ecuaciones alométricas, lo cual simplificaría, sustantivamente, las evaluaciones de carbono o volumen en bosques templados. Es importante señalar que las condiciones del sitio (edad, diversidad, etcétera) fueron clave para la obtención de los modelos y resultados arriba descritos, por lo que es necesario evaluar la viabilidad de

observed to be acceptable ($R^2 > 0.55$) for both images and treatments (the mean and central values of the plot).

Table 8. Error estimation for each variable.

Variable	SPOT 5 HRG Image		Quickbird Image	
	RMSE	RRMSE %	RMSE	RRMSE %
Aboveground carbon	0.78 Mg	23.89	0.77 Mg	25.28
Diameter at breast height	5.15 cm	20.13	10.70 cm	42.49
Height	2.50 m	12.93	6.29 m	33.24

The error associated to the aboveground carbon estimations was located within the interval documented by other authors. For example, Aguirre-Salado *et al.* (2012b) reported a RRSME of 36.81 % for the aboveground biomass in linear models in the forests of the state of *San Luis Potosí*. In another case, in which information from SPOT images was used to estimate aboveground carbon in pine forests, the RRSME was 30.16 % (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

The strong relationships occurring between the vegetation indices and the assessed forest parameters agree with the findings of other authors (Franklin, 2001; Mora *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2015), especially, the NDVI, and therefore, the spectral bands (R and IR). The NDVI is considered to be an indicator of the status of the vegetation, as it is characterized by representing a clear contrast between the regions that correspond to the visible red and the near infrared (Franklin, 2001).

Another common variable for most models was the K index (Luévano *et al.*, 2006); the value of K is defined as the spectral value of the density of the components in the pixel; besides, it also takes into account the digital value of the pixels, the total number of the species present, and the total number of individuals in a specific area, which, for the purposes of this study was 1 000 m².

The models for estimating the diameter at breast height and total height had high determination coefficients, for diameters ($R^2=0.86$ y 0.84) and heights ($R^2=0.93$ y 0.86) ($p<0.01$) for the SPOT and Quickbird sensors, respectively. The results suggest that, when reliable estimates of the diameters and heights are available, these can be applied to allometric equations, which would substantially simplify the evaluations of carbon or volume in temperate forests. It is important to point out that the conditions of the site (age, diversity, etc.) were key for obtaining the models and results described above; it is, therefore, necessary to evaluate the viability of this type of studies under different conditions from those that were presented in this study.

este tipo de estudios en condiciones diferentes a las que se presentaron en el presente trabajo.

Aunque en términos de resolución espacial *Quickbird* es mejor que *SPOT 5 HRG*, los resultados demuestran que, contrario a lo que se esperaba, *SPOT 5 HRG* tuvo los mejores modelos de ajuste en la mayoría de los parámetros forestales evaluados; en especial diámetros y alturas. Los parámetros forestales evaluados, principalmente carbono, estuvieron ligados a la respuesta espectral de la imagen (valores promedio principalmente), sin que el tipo de sensor jugara un papel demasiado importante en los resultados.

Conclusiones

Los resultados sugieren que es posible estimar parámetros forestales (altura total, diámetro normal, carbono aéreo) a partir de datos espectrales de imágenes satelitales. Se corroboró la validez del uso de índices espectrales de vegetación en la estimación de parámetros forestales. Los sensores utilizados mostraron consistencia en las relaciones entre los valores espectrales y el carbono, lo que demuestra la utilidad y practicidad del uso de sensores remotos en la estimación de carbono almacenado. El análisis comparativo entre los sensores empleados demostró que la alta resolución espacial no mejora, sustancialmente, las estimaciones de parámetros forestales basadas en sensores remotos.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) a través del proyecto "Definición de acciones sobre el riesgo en materia de adaptación y vulnerabilidad para el sector primario ante el cambio climático para el Estado de México" con Clave CONACYT: EDOMEX-2008-01-103001. Los autores agradecen las valiosas sugerencias y aportaciones de los dos revisores anónimos para la mejora sustancial del manuscrito original.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones por autor

Gustavo Torres Rojas: procesamiento y análisis de las imágenes satelitales y datos de campo, desarrollo de la investigación y análisis de los resultados; Martín Enrique Romero Sánchez: conceptualización, formulación y realización de la investigación, redacción y corrección del manuscrito; Efraín Velasco Bautista: supervisión del análisis estadístico y contribución a las observaciones del manuscrito; Antonio González Hernández: recopilación y análisis de información y revisión del manuscrito.

Although regarding spatial resolution *Quickbird* is better than *SPOT 5 HRG*, the results show that contrary to the expectations, *SPOT 5 HRG* had the best adjustment models in most evaluated forest parameters, especially diameters and heights. The evaluated forest parameters, mainly carbon, were linked to the spectral response of the image (primarily mean values), and the type of sensor did not play a major role in the results.

Conclusions

It is possible to estimate forest parameters (total height, diameter at breast height, aboveground carbon) based on spectral data of satellite images. The validity of the use of spectral vegetation indices in the estimation of forest parameters was corroborated. The utilized sensors showed consistency in the relationships between the spectral values and the carbon, which proves the usefulness and practicality of the use of remote sensing in the estimation of the stored carbon. The comparative analysis between the sensors used demonstrated that high spatial resolution does not substantially improve the estimations of forest parameters based on remote sensing.

Acknowledgements

This research was financed by the National Council of Science and Technology (Conacyt) through the "Definition of actions regarding the adaptation risk and vulnerability among the primary sector in the face of climate change for the State of Mexico" project, with the CONACYT Code EDOMEX-2008-01-103001. The authors wish to express their gratitude for the valuable suggestions and contributions by the two anonymous reviewers for the substantial improvement of the original manuscript.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contributions by author

Gustavo Torres Rojas: processing and analysis of the satellite images and field data, development of the research and analysis of the results; Martín Enrique Romero Sánchez: conceptualization, formulation and conduction of the research, drafting and correcting of the manuscript; Efraín Velasco Bautista: supervision of the statistical analysis and contribution of observations to the manuscript; Antonio González Hernández: collection and analysis of information and revision of the manuscript.

End of the English version



Referencias

- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M., A. y J. B. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies de arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, G., H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino Patula en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43(2): 209-220.
- Aguirre-Salado, C. A., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. A. González-Tagle, L. Miranda-Aragón, J. R. Valdez-Lazalde, A. I. Aguirre-Salado and G. Sánchez-Díaz. 2012a. Forest Cover Mapping in North-Central Mexico: A Comparison of Digital Image Processing Methods. *GIScience and Remote Sensing* 49(6): 895-914.
- Aguirre-Salado, C. A., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. A. González-Tagle, J. R. Valdez-Lazalde, L. Miranda-Aragón and A. I. Aguirre-Salado. 2012b. Construction of aboveground biomass models with remote sensing technology in the intertropical zone in Mexico. *Journal of Geographical Sciences* 22(4): 669-680.
- Aguirre-Salado, C. A., E. J. Treviño-Garza, O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. González-Tagle, J. R. Valdez-Lazalde, G. Sánchez-Díaz, R. Haapanen, A. I. Aguirre-Salado and L. Miranda-Aragón. 2014. Mapping aboveground biomass by integrating geospatial and forest inventory data through a k-nearest neighbor strategy in North Central Mexico. *Journal of Arid Land* 6:80-96. doi:10.1007/s40333-013-0191-x
- Asner, G. P. and J. Mascaro. 2014. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment* 140:614-624.
- Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233-238.
- Avitabile, V., A. Baccini, M. A. Friedl and C. Schmullius. 2012. Capabilities and limitations of Landsat and land cover data for aboveground woody biomass estimation of Uganda. *Remote Sensing of Environment* 117:366-380.
- Ayala L., R., S., B. H. J. De Jong y H. Ramírez M. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Capingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 153-157.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing* 65(1): 2-16.
- Carrillo A., F., M. Acosta M., E. Flores, A., J. E., Juárez, B. y E. Bonilla, P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en la Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(5): 779-793.
- Chávez P., S. J. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(9): 1025-1036.
- Chubey, M. S., S. E. Franklin and M. A. Wulder. 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(2): 383-394.
- Congalton, R. and G. Kass. 2009. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Second Edition. ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA. 200 p.
- Deering, D. W., J. W. Rouse, R. H. Haas and J. A. Schell. 1975. Measuring "Forage production" of grazing units from Landsat MSS data. *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. October 6-10. Ann Arbor, MI, USA. pp. 1169-1178.
- Franklin, S. E. 2001. *Remote sensing for sustainable forest management*. Lewis, NY, New York. 407 p.
- Gebhardt, S., T. Wehrmann, M. A. Muñoz R., P. Maeda, J. Bishop, M. Schramm, R. Kopeinig, O. Cartus, J. Kellerhoffer, R. Ressler, L. A. Santos and M. Schmidt. 2014. MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing* 6(5): 3923-3943.
- Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD). 2011. *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gain and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. Report Version COP17-1. Alberta, Canada. 235 p.
- Hall, R. J., R. S. Skakun, E. J. Arsenault and B. S. Case. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology of Management* 225: 378-390.
- Häme, T., J. Kilpi, H. A. Ahola, Y. Rauste, O. Anropov, M. Rautiainen, L. Sirro and S. Bounpone. 2013. Improved mapping of tropical forests with optical and sar imagery, part i: Forest cover and accuracy assessment using multi-resolution data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations Remote Sensing* 6(1): 74-91.
- Herold, M., R. M. Román-Cuesta, D. Mollicone, Y. Hirata, P. Van Laake, G. P. Asner, C. Souza, M. Skutsch, V. Avitabile and K. Macdicken. 2011. Options for monitoring and estimating historical carbon emissions from forest degradation in the context of REDD+. *Carbon Balance and Management* 6: 1-13.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3): 295-309.
- Ji, L., B. K. Wylie, D. R. N. Brown, B. Peterson, H. D. Alexander, M. C. Mack, J. Rover, M. P. Waldrop, J. W. Farland, X. Chen and N. J. Pastick. 2015. Spatially explicit estimation of aboveground boreal forest biomass in the Yukon River Basin, Alaska. *International Journal of Remote Sensing* 36(4): 939-953.
- Krause, K. 2005. *Radiometric Use of QuickBird Imagery*. Digital Globe Inc. Technical Note. World, Westminster, CO, USA. pp. 1-18.
- Kutner, M., C. Nachtsheim, J. Neter and W. Li. 2004. *Applied linear statistical models*. 5th Edition. ed. McGraw-Hill/Irwin. Chicago, IL, USA. 1396 p.
- Luévano, R., K. O. Luévano, G. Reyes, W. Ritter, G. A. Martínez, H. Rodríguez y E. Olivares. 2006. El índice Ka: un nuevo algoritmo para analizar los componentes de la superficie terrestre en imágenes de satélite. *Ciencia UNANL* 19(2): 171-178.
- Miranda-Aragón, L., E. J. Treviño-Garza, J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón, M. A. González-Tagle, M. Pompa-García y C. A. Aguirre-Salado. 2013. Tasa de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(2): 201-215.
- Mora, B., M. Wulder, J. White and G. Hobart. 2013. Modeling Stand Height, Volume, and Biomass from Very High Spatial Resolution Satellite Imagery and Samples of Airborne LiDAR. *Remote Sensing* 5(5): 2308-2326.
- Proteccion de Bosques del Estado de México (Probosque). 2010. *Inventario Forestal 2010*. Metepec, Edo. de Méx., México. 93 p.
- Rao, P. P. N. and A. Mohankumar. 1994. Cropland inventory in the command area of Krishnarajasagar project using satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 15(6): 1295-1305.
- Romero-Sánchez, E., F. Paz-Pellat, E. Palacios-Vélez, M. Bolaños-González, R. Valdez-Lazalde y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43(3): 291-307.
- Rouse, J. W. J., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering. 1974. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. NASA editors. Washington, DC., USA. pp. 309-317.
- Roy, D. P., M. A. Wulder, T. R. Loveland, C. E. Woodcock, R. G. Allen, M. C. Anderson, D. Helder, J. R. Irons, D. M. Johnson, R. Kennedy, T. A. Scambos, C. B. Schaaf, J. R. Schott, Y. Sheng, E. F. Vermote, A. S. Belward, R. Bindaschadler, W. B. Cohen, F. Gao, J. D. Hipple, P. Hostert, J. Huntington, C. O. Justice, A. Kilic, V. Kovalsky, Z. P. Lee, L. Lyburner, J. G. Masek, J. McCorkel, Y. Shuai, R. Trezza, J. Vogelmann, R. H. Wynne and Z. Zhu. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145: 154-172.

- Song, C. 2013. Optical remote sensing of forest leaf area index and biomass. *Progress in Physical Geography* 37: 98-113.
- Soudani, K., C. François, G. le Maire, V. Le Dantec and E. Dufrêne. 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment* 102(1-2): 161-175.
- Thenkabail, P. S., E. A. Enclona, M. S. Ashton, C. Legg and M. J. De Dieu. 2004. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment* 90(1): 23-43.
- Valdez-Lazalde, J. R., M. J. González-Gullén y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40(3): 383-394.
- Velasco B., E., M. E. Romero S., A. González H., F. Moreno S. y R. Pérez M. 2012. Funciones de Biomasa y Carbono Aéreo aplicable a arboles de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en México. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 34: 315-319.
- Woodcock, C. E., R. Allen, M. Anderson, A. Belward, R. Bindschadler, W. Cohen, F. Gao, S. N. Goward, D. Helder, E. Helmer, R. Nemani, L. Oreopoulos, J. Schott, P. S. Thenkabail, E. F. Vermote, J. Vogelmann, M. A. Wulder and R. Wynne. 2008. Free access to Landsat imagery. *Science* 320(5879): 1011-1013.
- Wulder, M. A., J. C. White, S. N. Goward, J. G. Masek, J. R. Irons, M. Herold, W. B. Cohen, T. R. Loveland and C. E. Woodcock. 2008. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment* 112(3): 955-969.
- Wulder, M. A., J. G. Masek, W. B. Cohen, T. R. Loveland and C. E. Woodcock. 2012. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment* 122: 2-10.
- Wulder, M. A., S. M. Ortlepp, J. C. White and S. Maxwell. 2014. Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34(2): 93-99.
- Zheng, D., J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J. Le Moine and S.-R. Ryu. 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 93(3): 402-411.





Artículo / Article

Fusarium oxysporum Schltld. y *Fusarium solani* (Mart.) Sacc.
causantes de la marchitez de plántulas de *Pinus* spp. en vivero

Fusarium oxysporum Schltld. and *Fusarium solani* (Mart.) Sacc.
cause wilting of *Pinus* spp. seedlings in the nursery

Leticia Robles Yerena¹, Santos Gerardo Leyva Mir², Armando Cruz Gómez²,
Moisés Camacho Tapia³, Daniel Nieto Ángel³ y Juan Manuel Tovar Pedraza²

Resumen

Las coníferas pueden tener daños importantes por enfermedades en vivero, entre las que destacan la pudrición de raíz y marchitez de plántulas. En *Pinus* spp. se les reconoce como un padecimiento en diversas regiones del mundo. Durante 2013 y 2014 se observaron tales síntomas, además de amarillamiento de plantas en estados iniciales de *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* en un vivero forestal en el estado de Guerrero, México. Así, se propuso el presente estudio, cuyos objetivos consistieron en identificar a los hongos fitopatógenos asociados con ese problema, mediante la caracterización morfológica de las estructuras de reproducción asexual; análisis de secuencias ITS del ADNr y pruebas de patogenicidad; además de, determinar la incidencia y severidad de cada una de las especies de patógenos de interés. A partir de las plántulas con manifestaciones de daño de las dos especies de pino, se obtuvieron ejemplares aislados pertenecientes al género *Fusarium*. La caracterización morfológica, prueba de patogenicidad, y análisis de secuencias ITS de tales organismos evidenciaron que *F. solani* y *F. oxysporum* son las especies fúngicas responsables de ocasionar los síntomas de marchitez de plantas de *Pinus*. No se observó diferencia significativa entre la incidencia y la severidad de la enfermedad causada por dichos agentes.

Palabras clave: *Fusarium oxysporum* Schltld., *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., incidencia, patogenicidad, *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Abstract

Conifers can suffer significant damage due to diseases in the nursery, primarily root rot and wilting of the seedlings; in *Pinus* spp. they are recognized as an ailment in various regions of the world. These symptoms -along with initial stages of yellowing of *Pinus patula* and *P. pseudostrobus* plants- were observed during 2013 and 2014 in a forest nursery in the state of Guerrero, Mexico. Thus, the present study was proposed, with the objective of identifying the phytopathogenic fungi associated with the problem through the morphological characterization of their asexual reproductive structures, analysis of the sequences of ITS regions of the rDNA, and pathogenicity tests, as well as of determining the incidence and severity of each of the pathogenic species of interest. Based on the seedlings of the two species of interest showing signs of damage, isolated specimens of the *Fusarium* genus were obtained. The morphological characterization, pathogenicity test, and analysis of sequences of ITS regions of these organisms proved that *F. solani* and *F. oxysporum* are the fungal species that cause symptoms of wilting of *Pinus* plants. No significant difference was observed between the incidence and the severity of the disease caused by these agents.

Key words: *Fusarium oxysporum* Schltld., *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., incidence, pathogenicity, *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Fecha de recepción/Reception date: 2 de junio de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 29 de julio de 2016.

¹ Posgrado en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. México.

² Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. México. Correo-e: jmtovar@colpos.mx

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

Introducción

La superficie forestal en México supera 144 millones de hectáreas, lo que equivale a 74 % del territorio nacional; casi 120 millones de hectáreas son severamente explotadas sin un manejo correcto, lo que propicia un gran deterioro (Cibrián *et al.*, 2007).

El pino mexicano (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) es una de las principales especies utilizadas para las plantaciones comerciales intensivas en el país y en el extranjero, debido a su tasa de crecimiento excepcionalmente rápido, buena forma de tronco y características favorables de la madera para los productos de celulosa (Dvorak *et al.*, 2000). El pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl.) tiene una amplia distribución geográfica natural en México y ofrece buena calidad de madera y productividad (Perry, 2009).

En los últimos años, en México se ha considerado conveniente reconocer la importancia de las enfermedades forestales en cuatro escenarios: bosques naturales, plantaciones, viveros forestales y árboles en áreas urbanas. El *damping-off* o marchitez de plántulas es una de las primeras enfermedades que el viverista enfrenta y que en ocasiones le causa entre 15 y 40 % de merma (Cibrián *et al.*, 2007). Además de, ser una limitante para la producción de algunos taxa, sobre todo de coníferas, constituye uno de los obstáculos más serios en la producción de plantas a gran escala (Torres, 2003).

Los árboles de coníferas pueden sufrir un daño significativo por enfermedades en vivero, causadas por *Fusarium* spp. Estos hongos fitopatógenos son responsables tanto de *damping-off* en pre y posemergencia, como de que las infecciones latentes resulten en el fracaso de las plántulas trasplantadas y en su establecimiento (Cibrián *et al.* 2007; Gordon *et al.*, 2015). *Fusarium oxysporum* Schltdl. se ha reconocido como la causa más importante de la pudrición de raíz e hipocotilo, en viveros. Asimismo, el manejo de las enfermedades de raíz provocadas por *Fusarium* en dicho ámbito se basa, principalmente, en la fumigación de suelos antes de la siembra (Gordon *et al.*, 2015).

En este contexto, los objetivos propuestos en el presente estudio consistieron en identificar a las especies de fitopatógenos causantes de los síntomas de pudrición de raíces y marchitez de plántulas de *Pinus patula* y *P. pseudostrobus*, mediante la combinación de su caracterización morfológica, análisis de secuencias ITS del ADNr, y pruebas de patogenicidad, así como determinar la incidencia y severidad provocada por los patógenos responsables de inducir dicha enfermedad.

Introduction

The forest area of Mexico exceeds 144 million hectares, amounting to 74 % of the national territory. Almost 120 million hectares are severely exploited without correct management, resulting in significant deterioration (Cibrián *et al.*, 2007).

The Mexican pine (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) is one of the main species used for intensive commercial plantations in Mexico and abroad, due to its exceptionally rapid growth rate, to the good shape of its stem and to the favorable characteristics of its timber for cellulose products (Dvorak *et al.*, 2000). White pine (*Pinus pseudostrobus* Lindl.) has a wide natural geographical distribution and provides good-quality wood and high productivity (Perry, 2009).

In recent years, it has been deemed convenient to acknowledge the importance of forest diseases in four settings: natural forests, plantations, forest nurseries, and trees in urban areas. The damping-off or wilting of the seedlings is one of the first diseases that the nursery keepers face, causing between 15 and 40 % of loss (Cibrián *et al.*, 2007). Besides being a limiting factor for the production of certain species, particularly conifers, it is one of the most serious obstacles to the large-scale production of plants (Torres, 2003).

The conifer trees can suffer significant damage due to diseases caused by *Fusarium* spp. in the nursery. These species of phytopathogenic fungi can cause damping-off in both pre- and post-emergence, as well as latent infections that can result in the failure of transplanted seedlings and in their establishment (Cibrián *et al.* 2007; Gordon *et al.*, 2015). *Fusarium oxysporum* Schltdl. has been recognized as the main cause of root and hypocotyl rot in the nurseries. Furthermore, the management of root diseases caused by *Fusarium* in this environment has consisted primarily in soil fumigation before sowing (Gordon *et al.*, 2015).

Based on this, the objectives proposed in this study were to identify the phytopathogenic species that cause the symptoms of root rot and seedling wilt in *Pinus patula* and *P. pseudostrobus* through the combination of morphological characterization, analysis of the sequences of the ITS regions of rDNA, and pathogenicity tests, besides determining the incidence and severity caused by the pathogens inducing that disease.



Materiales y Métodos

Recolección de muestras

Durante 2013 y 2014 se llevó a cabo un muestreo dirigido en un vivero forestal localizado en Chilpancingo, Guerrero, México, en donde se recolectaron 20 plántulas de *Pinus patula* y *P. pseudostrabus* con síntomas de marchitez y pudrición de raíz.

Aislamiento, purificación y conservación de hongos

Para aislar al agente causal, se desinfectaron fragmentos de raíces de *P. patula* y *P. pseudostrabus* con síntomas de pudrición seca; para ello, se utilizó la inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2 % durante 3 min; enseguida se lavaron dos veces en agua destilada esterilizada y se colocaron en cajas de Petri de 90 mm de diámetro con 20 mL de medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA) (Difco), con estreptomycin (Sigma®). Las cajas se colocaron en incubación a 25 °C, bajo un régimen de 12 h luz / 12 h de oscuridad.

Después de tres días de incubación, las colonias fúngicas con mayor frecuencia se transfirieron a cajas Petri con medio de cultivo PDA fresco y se colocaron en incubación bajo las condiciones anteriormente descritas. Una vez que se produjeron esporas, la purificación de los aislados se realizó con la técnica de cultivos monospóricos, mediante la transferencia de una espora a medio de cultivo PDA fresco. La conservación de los aislamientos se llevó a cabo con la transferencia de discos miceliales (5 mm de diámetro) a tubos criogénicos de 2 mL, con 1.5 mL de glicerina al 20 % (v/v) y almacenados a -80 °C.

Caracterización morfológica

La identificación de los aislados fúngicos se realizó a partir de la caracterización morfológica de sus estructuras de reproducción asexual. Para ello, fueron transferidos a medio de cultivo PDA y se incubaron a 25 °C bajo condiciones de luz continua. Después de 12 días de incubación, se hicieron preparaciones semipermanentes en glicerina al 100 %, con la finalidad de reconocer sus componentes en el microscopio compuesto *Olympus* BX41. Se efectuó la observación de 100 macroconidios y 100 microconidios, se registró la forma, tamaño, coloración y número de septos. Para la formación de fialides fue necesario cultivar los aislados fúngicos en medio de cultivo a base de puré de papa-agar durante cuatro días. Posteriormente, se preparó una cámara húmeda en una caja Petri de 90 mm con papel secante humedecido a punto de saturación, con agua destilada estéril; se transfirieron discos de 5 mm de PDA con crecimiento micelial y se incubaron durante tres días. Una vez transcurrido el tiempo, las fialides producidas en la cámara húmeda se observaron en el microscopio compuesto antes señalado. La identificación morfológica de los hongos, a nivel

Materials and Methods

Sample collection

During 2013 and 2014, a directed sampling procedure was carried out in a forest nursery located in *Chilpancingo, Guerrero, Mexico*, where 20 *Pinus patula* and *P. pseudostrabus* seedlings with symptoms of root rot and wilting.

Fungi isolation, purification and preservation

In order to isolate the causative agent, fragments of *P. patula* and *P. pseudostrabus* roots with symptoms of dry rot were decontaminated by immersion in a sodium hypochlorite solution at 2 % during 3 minutes; the fragments were washed twice in sterilized distilled water and placed in Petri dishes with a 90 mm diameter in 20 mL of potato-dextrose-agar (PDA) culture medium (Difco) with streptomycin (SigmaTM). The dishes were placed in incubation at a temperature of 25 °C, under a regime of 12 h light/12 h darkness.

After three days of incubation, the fungal colonies which occurred most frequently were transferred to Petri dishes with a fresh PDA culture medium and placed in incubation under the conditions described above. Once the colonies produced spores, the isolates were purified using the monospore culture technique, transferring a simple spore to a fresh PDA culture medium. Fungal isolates were preserved through the transference of mycelial disks (of 5 mm diameter) to 2 mL cryogenic tubes with 1.5 mL glycerin at 20 % (v/v) and stored at a temperature of -80 °C.

Morphological characterization

The fungal isolates most frequently separated were identified through the morphological characterization of the asexual reproduction structures. For this purpose, they were transferred to a PDA culture medium and incubated at 25 °C under continuous light. After 12 days of incubation, semipermanent preparations were made in glycerin at 100 % in order to examine their components under the *Olympus* BX41 compound microscope. 100 macroconidia and 100 microconidia were observed; their shape, size, color and number of septa were recorded. For the formation of phialides, the fungal isolates had to be cultivated in a potato-agar culture medium for four days. Subsequently, a humid chamber was prepared in a 90 mm Petri dish with blotting paper moistened to saturation point with sterilized distilled water; 5 mm PDA disks with mycelium growth were transferred and incubated during three days, after which the phialides produced in the humid chamber were observed under the described compound microscope. The fungi were morphologically identified at genus level using specialized codes (Barnett and Hunter, 1998); their

de género, se llevó a cabo con el uso de claves especializadas (Barnett y Hunter, 1998); la identificación de las especies se basó en las descripciones de Leslie y Summerell (2006).

Prueba de patogenicidad

La patogenicidad de seis aislados identificados morfológicamente como *Fusarium*, se determinó con base en la inoculación de 70 plántulas de *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* de un año de edad. La inoculación se hizo por inmersión de las raíces en una suspensión de conidios (1×10^6 esporas mL^{-1}) por 10 h. Se utilizaron 10 plántulas de cada especie, cuyas raíces se colocaron por 10 h en agua destilada estéril, mismas que sirvieron como testigo. Concluido este paso, las plántulas se depositaron, individualmente, en macetas con *Peat Moss* y agrolita (2:1), las cuales se colocaron en un invernadero bajo condiciones de 20 a 25 °C y humedad relativa de 50-80 %. La prueba de patogenicidad se efectuó dos veces.

La incidencia de la enfermedad se determinó mediante el registro de los síntomas y el número de árboles muertos. Con estos datos se calculó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE), con el método de integración trapezoidal (Campbell y Madden, 1990). La severidad de la enfermedad se estimó por aislado fúngico y en cada una de las dos especies de *Pinus*, con la fórmula de Townsend y Hueberger:

$$DS (\%) = [\sum (nv) / NV] \times 100$$

Donde:

- n = Grado de infección acorde a la escala
- v = Número de plantas por categoría
- N = Grado máximo de infección
- V = Número de plantas en total

De acuerdo a los diferentes grados de infección, se definió una escala porcentual de la severidad aparente, de la siguiente manera: Clase 0 = 0 % de daño (planta asintomática); Clase 1 = 20 % de daño (acículas caídas); Clase 2 = 40 % de daño (clorosis o amarillamiento); Clase 3 = 60 % de daño (puntas secas); Clase 4 = 20 % de daño (marchitez); Clase 5 = 20 % de daño (plantas muerta). Con los resultados obtenidos a partir de las interacciones de cada uno de los aislados y las dos especies de pino evaluadas, se construyeron curvas de progreso de la enfermedad, las cuales fueron ajustadas a modelos epidemiológicos (Logístico, Exponencial, Monomolecular y Gompertz) con la finalidad de determinar los parámetros de intensidad inicial de la enfermedad (I_0) y la tasa de incremento (r), y con ello tener un indicativo de la forma y estructura de desarrollo de la enfermedad (Campbell y Madden, 1990). El ajuste de los modelos epidemiológicos y ABCPE se realizó con el programa SAS ver. 9.3. (SAS, 2011).

identification at species level was based on the descriptions by Leslie and Summerell (2006).

Pathogenicity test

The pathogenicity of six isolates morphologically identified as *Fusarium* was determined through the inoculation of 70 one-year-old *Pinus patula* and *P. pseudostrobus* seedlings. The inoculation was carried out by immersing the roots in a suspension of conidia (1×10^6 spores mL^{-1}) during 10 hours. Ten seedlings of each species, whose roots were placed in sterilized distilled water during 10 h, served as controls. After this step was concluded, the seedlings were individually planted in flowerpots with peat moss and agrolite (2:1) and placed in a nursery at a temperature of 20 to 25 °C and a relative humidity of 50-80 %. The pathogenicity test was carried out twice.

The incidence of the disease was determined by the recorded symptoms and the number of dead trees. With these data, the area under the progress curve of the disease (AUDPC) using the trapezoidal integration method (Campbell and Madden, 1990). The severity of the disease was estimated for each fungal isolate and in each of the two *Pinus* species using the formula of Townsend and Hueberger:

$$DS (\%) = [\sum (nv) / NV] \times 100$$

Where:

- n = Degree of infection according to the scale
- v = Number of plants per category
- N = Maximum degree of infection
- V = Total number of plants

According to the various degrees of infection, an apparent severity rating scale was devised as follows: Class 0 = 0 % damage (asymptomatic plant); Class 1 = 20 % damage (fallen needles); Class 2 = 40 % damage (chlorosis or yellowing); Class 3 = 60 % damage (dry tips); Class 4 = 20 % damage (wilting); Class 5 = 20 % damage (dead plant). With the results obtained based on the interactions of each of the isolates and the two assessed pine species, disease progress curves were built and adjusted to epidemiological models (Logistic, Exponential, Monomolecular and Gompertz) in order to determine the parameters of intensity at the onset of the disease (I_0), and the increase rate (r) and thus, to obtain a signal of the form and development structure of the disease (Campbell and Madden, 1990). The epidemiological models and the AUDPC were adjusted using the SAS 9.3 software (SAS, 2011).



Extracción de ADN, amplificación por PCR y secuenciación

La extracción de ADN genómico de seis aislados fúngicos evaluados en la prueba de patogenicidad e identificados morfológicamente como pertenecientes al género *Fusarium* se hizo mediante la maceración de 50 a 100 mg del micelio de colonias con 10 días de edad. Posteriormente, se siguió el protocolo indicado en el kit de extracción *Plant DNeasy Mini Kit* (Qiagen®). La calidad del ADN se verificó por electroforesis en gel de agarosa al 0.8 %, con buffer de corrida TBE 0.5 X, para lo cual se usaron 5 μ L de ADN, a 90 volts. El gel se analizó en un transiluminador Gel-Docmod 2000 (BIORAD®).

Para la PCR se utilizaron los iniciadores universales ITS5/ITS4 (White *et al.*, 1990). La mezcla de reacción se preparó a un volumen final de 25 μ L, buffer de PCR 1X, 2.5 mM MgCl₂, 0.2 mM dNTP, 0.4 μ M de cada primer, 1U ADN polimerasa BioTecMol® y 100 ng de ADN. La PCR se llevó a cabo en un termociclador C1000 (BIORAD®) con una desnaturalización inicial de 94 °C por 2 min, seguida de 35 ciclos de 94 °C por 30 s, 55 °C por 30 s, 72 °C por 1 min; y una extensión final de 72 °C por 10 min. Los productos amplificados se verificaron por electroforesis en gel de agarosa al 0.8 %. El gel se analizó en un transiluminador Gel-Docmod 2000 (BIORAD®).

Los fragmentos amplificados con los iniciadores ITS5/ITS4, se purificaron siguiendo el protocolo de *DNA clean and concentrator* (Zymo Research®). Para ello, en un tubo de microcentrifuga de 1.5 mL se agregaron 5 volúmenes del buffer *DNA Binding* y se mezcló por inversión. La mezcla se transfirió en una columna *Zymo-Spin* en un tubo de colección de 2 mL. Se centrifugó durante 30 s a 8 000 rpm, y se descartó el sobrenadante. Se agregaron 200 μ L de buffer *DNA Wash* dentro de la columna y se centrifugó durante 30 s a 8 000 rpm. Se descartó el sobrenadante y se cambió a un tubo nuevo de 2 mL. Se adicionaron 60 μ L buffer de *DNA Elution* directamente en la columna, y el producto se incubó durante 1 min. Se transfirió la columna a un tubo nuevo de 1.5 mL y se diluyó el ADN. Los fragmentos de ADN purificados se mandaron a secuenciar a la empresa *Macrogen*® de Corea. Las secuencias obtenidas se compararon en la base de datos en NCBI con la herramienta *BLASTn*.

Resultados y Discusión

Identificación morfológica

Del material vegetal sintomático se obtuvieron seis aislados, de los cuales los de mayor frecuencia fueron de dos tipos: el primero mostró crecimiento micelial blanco-amarillento, y el segundo crecimiento micelial inicialmente blanco, pero con el paso del tiempo se tornó de color rojo-violáceo; ambos tipos de crecimiento fueron afelpados. Tales tipos de colonias se han

DNA extraction, amplification by PCR and sequentiation

Genomic DNA of six fungal isolates assessed in the pathogenicity test and morphologically identified as belonging to the *Fusarium* genus was extracted by macerating 50 to 100 mg of mycelium from 10 day old colonies. Subsequently, the protocol indicated in the *Plant DNeasy Mini Kit* (Qiagen®) extraction kit was followed. The quality of the DNA was verified by electrophoresis in agarose gel at 0.8 % with 0.5 X TBE buffer using 5 μ L of the DNA and run with 90 volts. The gel was analyzed in a *Gel-Docmod 2000* (BIORAD®) transilluminator.

The universal initiators ITS5/ITS4 were used for the PCR (White *et al.*, 1990). The reaction mixture was prepared at a final volume of 25 μ L, with a 1X PCR buffer, 2.5 mM MgCl₂, 0.2 mM dNTP, 0.4 μ M of each primer, 1U of DNA polymerase (BioTecMol®) and 100 ng of DNA. The PCR was carried out in a C1000 (BIORAD®) thermocycler with an initial denaturalization of 2 min at 94 °C, followed by 35 cycles of 30 s at 94 °C, 30 s at 55 °C, 1 min at 72 °C, and a final extension of 10 min at 72°C. The amplified products were verified by electrophoresis in agarose gel at 0.8 %. The gel was analyzed in a *Gel-Docmod 2000* (BIORAD®) transilluminator.

The fragments amplified with the ITS5/ITS4 initiators were purified using the *DNA clean and concentrator* protocol (Zymo Research®). For this purpose, 5 volumes of the *DNA Binding* buffer were added in a 1.5 mL microcentrifuge tube and mixed by inversion. The mixture was transferred to a *Zymo-Spin* column in a 2 mL collection tube. It was centrifuged for 30 s at 8 000 rpm, and the supernatant was discarded. 200 μ L of the *Wash DNA* buffer were added to the column and centrifuged for 30 s at 8 000 rpm. The supernatant was discarded, and the mixture was transferred to a new 2 mL tube. 60 μ L of *Elution DNA* buffer were added directly to the column, and the product was incubated during 1 min. The column was transferred to a new 1.5 mL tube and the DNA was diluted. The purified DNA fragments were sent to the Korean enterprise *Macrogen*® for sequencing. The sequences thus obtained were compared in the database at the NCBI using the *BLASTn* tool.

Results and Discussion

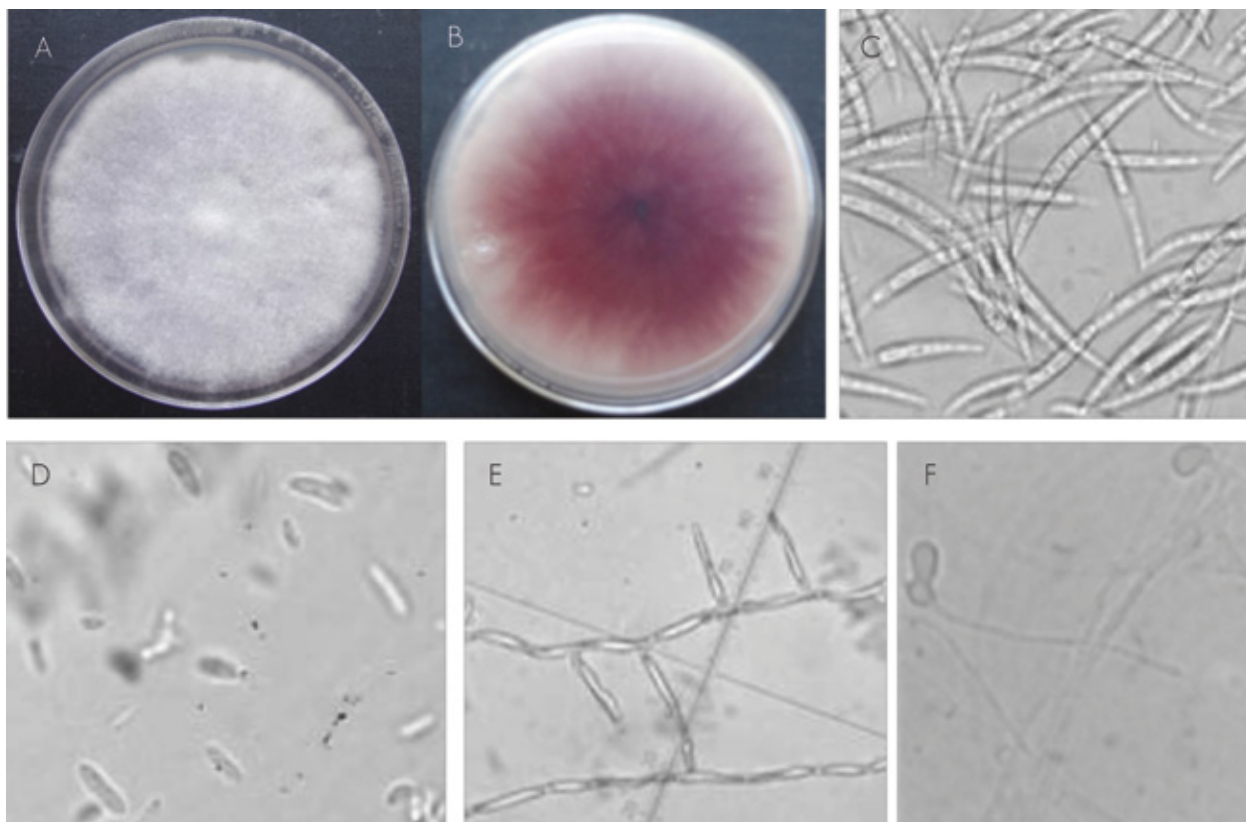
Morphological identification

Six isolates were obtained from the symptomatic vegetal material; of these, two types were found to be the most frequently occurring: the first showed white-yellow mycelium growth, and the second, initially white mycelium growth that, however, turned purple-red with time; both growths were velvety. These types of colonies have been recorded for *Fusarium* species (Nelson *et al.*, 1983; Leslie and Summerell, 2006).

registrado para especies de *Fusarium* (Nelson *et al.*, 1983; Leslie y Summerell, 2006).

El aislado con crecimiento micelial de coloración púrpura-violeta en medio de cultivo PDA (Figura 1A-B), presentó macroconidios falcados, hialinos, con pared delgada, de 3-5 septos, de 19-43 x 3.1-5.4 µm y con célula basal en forma de pie (Figura 1C). Microconidios elípticos a ovales, unicelulares (Figura 1D). Monofialides no ramificadas cortas y agudas (Figura 1E). Clamidosporas en pares, intercalares y terminales (Figura 1F). Todas las características coincidieron con lo consignado por Leslie y Summerell (2006) para *Fusarium oxysporum*.

The isolate with purple-violet mycelium growth in a PDA culture medium (Figure 1A-B) had 19-43 x 3.1-5.4 µm sickle-shaped, hyaline, thin-walled macroconidia with 3-5 septa and with a foot-shaped basal cell (Figure 1C). Elliptic to oval unicellular microconidia (Figure 1D). Short, sharp unbranched monophialides (Figure 1E). Intercalary and terminal chlamydospores in pairs (Figure 1F). All the characteristics agreed with those recorded by Leslie and Summerell (2006) for *Fusarium oxysporum*.



A) Colonia de 8 días de edad; B) Reverse de colonia con coloración roja-púrpura; C) Macroconidios; D) Microconidios; E) Filíalides; F) Clamidosporas.
 A) Eight-day colony; B) Reverse of the colony with a purple-red color; C) Macroconidia; D) Microconidia; E) Phialides; F) Chlamydospores

Figura 1. Morfología de colonias y estructuras de reproducción asexual de *Fusarium oxysporum* Schltdl. obtenido de raíces de *Pinus* spp. con síntomas de pudrición de raíz

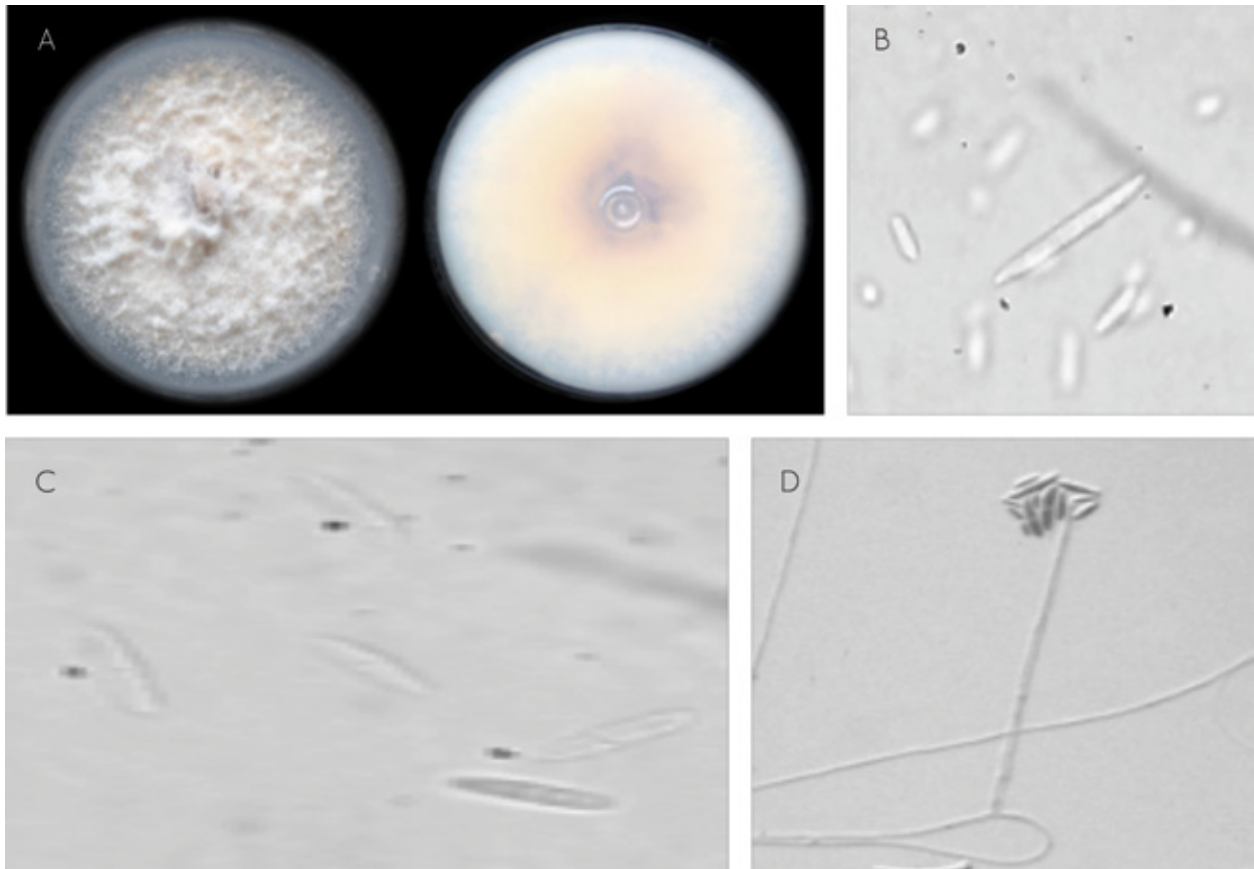
Figure 1. Morphology of colonies and asexual reproductive structures of *Fusarium oxysporum* Schltdl. taken from *Pinus* spp. with root rotting symptoms.

El aislado fúngico con crecimiento micelial algodonoso blanco-amarillento (Figura 2A-B) exhibió macroconidios hialinos, fusiformes, robustos, con 5-6 septos, con la célula apical levemente encorvada y puntiaguda (Figura 2C). Los microconidios fueron ovales y reniformes, hialinos, con 1-2 septos (Figura 2D), y producidos en monofialides largas (Figura 2E). Las clamidosporas se formaron rápidamente, ovales, intercalares entre las hifas o terminales en las ramas laterales de las mismas, se presentaron solas y en pares. Todas las características coincidieron

On the other hand, the fungal isolate with white-yellow cottony mycelium growth (Figure 2A-B) exhibited robust hyaline, fusiform macroconidia with 5-6 septa and with a slightly curved and pointed apical cell (Figure 2C). The microconidia were hyaline, oval and kidney-shaped, with 1-2 septa (Figure 2D), and produced in long monophialides (Figure 2E). The chlamydospores were quickly formed; they were oval, intercalary between hyphae or terminals in the side branches of the hyphae, and occurred individually and in pairs.

con los resultados de Leslie y Summerell (2006) para *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. (Teleomorfo: *Haematonectria haematococca*).

All the characteristics agreed with the findings of Leslie and Summerell (2006) for the *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. species (Teleomorfo: *Haematonectria haematococca*).



A) Colonia de 8 días de edad; B) Reverso de colonia con coloración amarillenta; C) Macroconidios; D) Microconidios; E) Fíalides.

A) Eight-day colony; B) Reverse of the colony with a yellowish color; C) Macroconidia; D) Microconidia; E) Phialides.

Figura 2. Morfología de colonias y estructuras de reproducción asexual de *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. obtenido de raíces de *Pinus* spp. con síntomas de pudrición de raíz.

Figure 2. Figure 1. Morphology of colonies and asexual reproductive structures of *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. taken from *Pinus* spp. with root rotting symptoms.

Análisis de secuencias ITS

Las secuencias obtenidas a partir del ADN de los seis aislados fúngicos identificados morfológicamente como *Fusarium* se compararon con las secuencias de la base de datos del *GenBank*, cinco de ellas (KU056813, KU056814, KU056816, KU056817, KU056818) mostraron 99 % de identidad con *F. oxysporum*, mientras que una (KU056815) presentó 99 % de identidad con las de *Fusarium solani*. Lo anterior confirmó los resultados de la caracterización morfológica; por lo tanto ambas especies del género de interés están involucradas como agentes causales de enfermedades de la raíz en *Pinus* spp., en México.

A *Fusarium oxysporum* se le reconoce como agente infeccioso de *Pinus strobus* L. en Estados Unidos de América (Ocamb

Analysis of the sequences of ITS regions

The sequences obtained from the DNA of the six fungal isolates morphologically identified as *Fusarium* were compared with the sequences submitted to the database of the *GenBank*, and five of them (KU056813, KU056814, KU056816, KU056817, KU056818) showed 99 % identity with *F. oxysporum*, while only one (KU056815) exhibited 99 % with those of *Fusarium solani*. This confirmed the results of the morphological characterization, which indicates that both species of the genus of interest are causative agents of root diseases in *Pinus* spp. in Mexico.

Fusarium oxysporum has been recognized as an infectious agent of *Pinus strobus* L. in the United States of America (Ocamb and Juzwik, 1995; Ocamb *et al.*, 2002); *P. elliotii*

y Juzwik, 1995; Ocamb *et al.*, 2002); *P. elliotii* Engelm. y *P. taeda* L. en Argentina (Lori y Salerno, 2003); *P. wallichiana* A. B. Jaks en India (Hassan *et al.*, 2011); *P. halepensis* Miller en Argelia (Lazreg *et al.*, 2014) y *P. tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & J. P. Perry en Colombia (Herron *et al.*, 2015). *Fusarium solani* se asocia con tejidos de *Pinus strobus* en Estados Unidos de América (Ocamb y Juzwik, 1995); *P. radiata* D. Don en Nueva Zelanda (Dick y Dobbie, 2002); *P. elliotii* y *P. taeda* en Argentina (Lori y Salerno, 2003); *P. tropicalis* Morelet en Cuba (Guerra *et al.*, 2004) y *P. halepensis* en Argelia (Lazreg *et al.*, 2014).

Prueba de patogenicidad

Quince días después de la inoculación (ddi), todas las plantas inoculadas con la suspensión de esporas exhibieron síntomas de marchitez, mientras que las plántulas testigo permanecieron asintomáticas. A partir de los ejemplares inoculados, se reaislaron colonias de *Fusarium*, las cuales presentaron las mismas características morfológicas que las inoculadas originalmente, lo que completó así los postulados de Koch. Esto confirmó que *Fusarium oxysporum* y *F. solani* son las especies de hongos fitopatógenos causantes de los síntomas de pudrición de raíz y marchitez en plántulas de *P. patula* y *P. pseudostrobus* en Guerrero, México. De manera similar, Herron *et al.* (2015) realizaron pruebas de patogenicidad exitosas con aislados de *F. circinatum* Nirenberg & O'Donnell, *F. marasianum* Herron, Marinc. & M. J. Wingf., *F. parvisorum* Herron, Marinc. & M. J. Wingf. y *F. sororula* Herron, Marinc. & M. J. Wingf. en plántulas de *Pinus patula* en Colombia. Latiffah *et al.* (2009) identificaron a *F. solani* y *F. oxysporum* como los hongos prevalentes en suelos de un área forestal en Malasia, pero no determinaron la patogenicidad de los aislados.

Incidencia y severidad de la enfermedad

Con respecto a la incidencia de la enfermedad, el aislado 1 de *F. oxysporum* tuvo 100 % únicamente en *P. pseudostrobus* a los 8 ddi, mientras que el aislado 2 de *F. oxysporum* registró el mismo porcentaje en igual periodo para las dos especies de *Pinus*. Igualmente, *F. solani* ocasionó 100 % de ella en los dos taxa de *Pinus* a los 14 ddi (Cuadro 1). Lo anterior es indicativo de que el aislado 2 de *F. oxysporum* causa enfermedad a una velocidad mayor que los demás, lo cual está sujeto a una combinación positiva de intensidad inicial de la enfermedad y una tasa de incremento, mientras que en los otros aislados no sucedió, y la velocidad en que se alcanzó la totalidad de infestación fue menor.

Engelm. and *P. taeda* L. in Argentina (Lori and Salerno, 2003); *P. wallichiana* A. B. Jaks in India (Hassan *et al.*, 2011); *P. halepensis* Miller in Algeria (Lazreg *et al.*, 2014), and *P. tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & J. P. Perry in Colombia (Herron *et al.*, 2015). *Fusarium solani* has also been associated with *Pinus strobus* tissues in the United States of America (Ocamb and Juzwik, 1995); *P. radiata* D. Don in New Zealand (Dick and Dobbie, 2002); *P. elliotii* and *P. taeda* in Argentina (Lori and Salerno, 2003); *P. tropicalis* Morelet in Cuba (Guerra *et al.*, 2004), and *P. halepensis* in Algeria (Lazreg *et al.*, 2014).

Pathogenicity test

Fifteen days after inoculation (DAI), all the plants inoculated with the spores' suspension exhibited symptoms of wilting, while the control seedlings remained asymptomatic. *Fusarium* colonies were re-isolated from the inoculated specimens and exhibited the same morphological characteristics as the originally inoculated colonies, whereby Koch's postulates were completed. This confirmed that *Fusarium oxysporum* and *F. solani* are the species of phytopathogenic fungi that cause the symptoms of root rot and wilting of *P. patula* and *P. pseudostrobus* seedlings in Guerrero, Mexico. Similarly, Herron *et al.* (2015) carried out successful pathogenicity tests with *F. circinatum* Nirenberg & O'Donnell, *F. marasianum* Herron, Marinc. & M. J. Wingf., *F. parvisorum* Herron, Marinc. & M. J. Wingf. and *F. sororula* Herron, Marinc. & M. J. Wingf. isolates in *Pinus patula* seedlings in Colombia, while Latiffah *et al.* (2009) identified *F. solani* and *F. oxysporum* as the prevailing species in the soils of a forest area in Malasya, but did not determine the pathogenicity of the isolates.

Incidence a severity of the disease

In regard to the incidence of the disease, *F. oxysporum* isolate 1 had 100 % only in *P. pseudostrobus* 8 DAI, while *F. oxysporum* isolate 2 registered the same percentage during the same period for the two *Pinus* species. Likewise, *F. solani* had 100 % in both *Pinus* species 14 DAI (Table 1). This indicates that the *F. oxysporum* isolate 2 causes disease faster than the other isolates, due to a positive combination of initial intensity of the disease and an increase rate, while this was not the case with the other isolates, in which total infestation occurred less rapidly.



Cuadro 1. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) en plántulas de *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. inoculadas con cinco aislados de *Fusarium oxysporum* Schltld., y un aislado de *Fusarium solani* (Mart.) Sacc.

Especie	Aislado	Incidencia inicial (%)	Incidencia final (%)	ABCPE (%· día)
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	66.6	100	1 099.2
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	33.3	100	1 299.9
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	33.3	100	799.5
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	33.3	100	699.6
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	33.3	100	999.6
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	66.6	100	1 299.6
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	66.6	100	1 399.8
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	33.3	100	1 299.9
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	33.3	100	899.7
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	33.3	100	899.4
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	33.3	100	999.6
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	33.3	100	699.9

Table 1. Area under the progress curve of the disease (AUDPC) in *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham. and *Pinus pseudostrabus* Lindl. seedlings inoculated with five *Fusarium oxysporum* Schltld. isolates and a *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. isolate.

Species	Isolate	Initial incidence (%)	Final incidence (%)	AUDPC (%· day)
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	66.6	100	1 099.2
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	33.3	100	1 299.9
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	33.3	100	799.5
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	33.3	100	699.6
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	33.3	100	999.6
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	66.6	100	1 299.6
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	66.6	100	1 399.8
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	33.3	100	1 299.9
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	33.3	100	899.7
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	33.3	100	899.4
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	33.3	100	999.6
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	33.3	100	699.9

Al determinar la severidad de cada aislado de *Fusarium*, el de mayor valor fue el 1 de *F. oxysporum* en *P. pseudostrabus*, entretanto el aislado de 2 de *F. oxysporum* fue más virulento en *P. patula*, pues llegó a matar a los árboles a los 21 ddi. Asimismo, es importante destacar que el aislado de *F. solani* provocó lo mismo en las plántulas inoculadas en ambos pinos. Lo anterior coincidió con lo establecido por Lazreg *et al.* (2014) quienes identificaron a siete especies de *Fusarium* asociadas a plántulas de *P. halepensis*; definieron diferencias significativas en la longitud de brotes y de raíces, e índice de vigor en plántulas inoculadas con los diversos aislados; además, señalaron que *F. solani* sobresalió sobre otras especies del género, con respecto a la rapidez con la que colonizaron las raíces completas de los pinos inoculados.

When the severity of each *Fusarium* isolate was determined, *F. oxysporum* isolate 1 in *P. pseudostrabus* had the highest value, while the *F. oxysporum* isolate 2 was the most virulent in *P. patula*, having killed the trees 21 DAL. Furthermore, it should be emphasized that the *F. solani* isolate caused the same effect on the inoculated seedlings of both species. This agrees with the findings of Lazreg *et al.* (2014), who identified seven *Fusarium* species associated to *P. halepensis* seedlings, defined significant differences in shoot and root length and in the vigor index in seedlings inoculated with the various isolates; likewise, they pointed out that *F. solani* stood out from among the other species of the genus for the rapidity with which they colonized the complete roots of the inoculated pine trees.

El modelo logístico ($y = 1 / (1 + ((1-y_0) / y_0)^* \exp (-rL * t))$) fue el que mejor describió el progreso de los síntomas en ambas taxa de *Pinus*, con la presencia de los aislados de *Fusarium* evaluados a través del tiempo. Para el caso del aislado 2 de *F. oxysporum* en *P. pseudostrobus*, se observó que la intensidad inicial de la enfermedad fue mayor con respecto a *P. patula*, pero la velocidad de incremento de la severidad fue menor. Para el aislado de *F. solani*, las dos especies de pino mostraron una intensidad inicial de la enfermedad de 0.030 % y una tasa de incremento del porcentaje de severidad por día de 0.32 %. Por lo tanto, el aislado 2 de *Fusarium oxysporum* fue el más virulento, ya que registró un crecimiento de 0.397 % por día en comparación con el aislado de *F. solani*, el cual exhibió un crecimiento de 0.32 % por día (Cuadro 2). Esto es indicativo de que una mayor intensidad inicial de la enfermedad afecta el desarrollo de la misma; en el ABCPE, la intensidad inicial se relacionó con la cantidad de inóculo al tiempo 0, pero este inóculo aumentará según la tasa de incremento, el cual está sujeto, además, a la virulencia del patógeno y la especie de pino.

The logistic model ($y = 1 / (1 + ((1-l) / l) * \exp (-rL * t))$) was the one that best described the progression of symptoms in both pine species in the presence of the *Fusarium* isolates evaluated over time. In the case of isolate 2 of *F. oxysporum* in *P. pseudostrobus*, it was observed that the initial intensity of the disease was higher with respect to *P. patula*, but the speed of increase of severity was lower. For the *F. solani* isolate, the two species of pine showed an initial intensity of disease 0.030 % and a rate of increase of severity percentage of 0.32 per day. Therefore, the *Fusarium oxysporum* isolate 2 was the most virulent, as it grew 0.397 % per day compared to the *F. solani* isolate, which showed a growth of 0.32 % per day (Table 2). This is indicative that a higher initial intensity disease affects its development; in ABCPE, the initial intensity is related to the amount of inoculum at time 0, but this inoculum will increase as the rate of increase does, which is also subject to the virulence of the pathogen and to the pine species.



Cuadro 2. Ajuste de modelo logístico del progreso de la severidad de cinco aislados de *Fusarium oxysporum* Schltld. y un aislado de *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. inoculados en plántulas de *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Especie	Aislado	Severidad inicial (%)	Severidad final (%)	y0	rL
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	13.3	100	0.0433	0.240
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	6.6	100	0.015	0.397
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	6.6	100	0.010	0.315
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	6.6	100	0.019	0.269
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	6.6	100	0.018	0.276
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	13.3	100	0.030	0.320
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	13.3	100	0.032	0.321
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	6.6	100	0.028	0.305
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	6.6	100	0.006	0.393
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	6.6	100	0.047	0.221
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	6.6	100	0.016	0.278
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	6.6	100	<0.001	0.63

Table 2. Adjustment of the logistic model of the progress of the severity of five *Fusarium oxysporum* Schltld. isolates and a *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. isolate inoculated in *Pinus patula* Schiede ex Schltld. & Cham. and *Pinus pseudostrobus* Lindl. seedlings.

Species	Isolate	Initial severity (%)	Final severity (%)	y0	rL
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 1	13.3	100	0.0433	0.240
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 2	6.6	100	0.015	0.397
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 3	6.6	100	0.010	0.315
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 4	6.6	100	0.019	0.269
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltld. 5	6.6	100	0.018	0.276
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	13.3	100	0.030	0.320

Continue Table 2...

Continue Table 2..

Especie	Aislado	Severidad inicial (%)	Severidad final (%)	y0	rL
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltdl. 1	13.3	100	0.032	0.321
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltdl. 2	6.6	100	0.028	0.305
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltdl. 3	6.6	100	0.006	0.393
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltdl. 4	6.6	100	0.047	0.221
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium oxysporum</i> Schltdl. 5	6.6	100	0.016	0.278
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.	6.6	100	-0.001	0.63

De manera similar, Herron *et al.* (2015) determinaron que diversos aislados de *Fusarium marasasanum*, *F. parvisorum* y *F. sororula* causaron enfermedad en plántulas de *Pinus patula*; además de que existió variación en la patogenicidad y virulencia entre aislados fúngicos del mismo taxon.

Conclusiones

De acuerdo a la combinación de datos de caracterización morfológica, análisis de secuencias ITS y pruebas de patogenicidad, se demostró que *Fusarium solani* y *F. oxysporum* son las especies de hongos responsables de ocasionar los síntomas de pudrición de raíz y marchitez de plantas de *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* en Guerrero, México. Asimismo, no se observó diferencia entre la incidencia y severidad de la enfermedad causada por cinco aislados de *F. oxysporum* y un aislado de *F. solani*.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Leticia Robles Yerena: recolección de material vegetal, aislamiento de hongos, pruebas de patogenicidad en invernadero, toma de datos y redacción del manuscrito; Santos Gerardo Leyva Mir: recolección de material vegetal, definición del diseño experimental y revisión del manuscrito; Armando Cruz Gómez: purificación y caracterización morfológica de hongos; Moisés Camacho Tapia: extracción de ADN y amplificación por PCR; Daniel Nieto Ángel: recolección de material vegetal y aportación de material de laboratorio; Juan Manuel Tovar Pedraza: definición del estudio, análisis de secuencias de ADN y revisión del manuscrito.

Referencias

- Barnett, H. L. and B. B. Hunter. 1998. Illustrated genera of imperfect fungi. The American Phytopathological Society. St Paul, MN, USA. 218 p.
- Campbell, C. L. and L. V. Madden. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. Wiley-Interscience. New York, NY, USA. 532 p.
- Cibrián T., D., D. Alvarado R. y S. E. García D. 2007. Enfermedades forestales en México/Forest diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo-Conafor-Semarnat, USDA Forest Service, Natural Resources Canada, Conafor. Chapingo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 587 p.
- Dick, M. A. and K. Dobbie. 2002. Species of *Fusarium* on *Pinus radiata* in New Zealand. New Zealand Plant Protection 55: 58-62.

Similarly, Herron *et al.* (2015) determined that various *Fusarium* marasasanum, *F. parvisorum* and *F. sororula* isolates caused disease in *Pinus patula* seedlings; furthermore, they pointed out that there was a variation in the pathogenicity and virulence between fungal isolates of the same species.

Conclusions

Based on the combination of data of the morphological characterization, analysis of sequences of ITS regions and pathogenicity tests, *Fusarium solani* and *F. oxysporum* were shown to be the fungal species that cause root rot and wilting of *Pinus patula* and *P. pseudostrobus* plants in Guerrero, Mexico. Also, no differences were observed between the incidence and severity rates of the disease caused by five *F. oxysporum* isolates and a *F. solani* isolate.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Leticia Robles Yerena: collection of vegetal materials, isolation of fungi, pathogenicity tests in the nursery, data collection and drafting of the manuscript; Santos Gerardo Leyva Mir: collection of vegetal materials, definition of the experimental design and revision of the manuscript; Armando Cruz Gómez: purification and morphological characterization of the fungi; Moisés Camacho Tapia: DNA extraction and amplification by PCR; Daniel Nieto Ángel: collection of vegetal materials and contribution of laboratory materials; Juan Manuel Tovar Pedraza: definition of the study, analysis of DNA sequences and revision of the manuscript.

End of the English version



- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio and T. K. Stangen. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. USA CAMCORE Cooperative, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. 234 p.
- Gordon, T. R., C. L. Swett and M. J. Wingfield. 2015. Management of *Fusarium* diseases affecting conifers. *Crop Protection* 73: 28-39.
- Guerra, C., H. Cruz, I. Vila, A. Duarte y M. O. López. 2004. Principales hongos que afectan a *Pinus tropicalis* Morelet en Cuba. *Fitosanidad* 8(2): 9-12.
- Hassan D. G., M. A. Beig, F. A. Ahanger, N. A. Ganai and M. A. Ahangar. 2011. Management of root rot caused by *Rhizoctonia solani* and *Fusarium oxysporum* in blue pine (*Pinus wallichiana*) through use of fungal antagonists. *Asian Journal of Plant Pathology* 5(2): 62-74.
- Herron, D. A., M. J. Wingfield, B. D. Wingfield, C. A. Rodas, S. Marincowitz and E. T. Steenkamp. 2015. Novel taxa in the *Fusarium fujikuroi* species complex from *Pinus* spp. *Studies in Mycology* 80: 131-150.
- Latiffah, Z., M. I. Padzilah, S. Baharuddin and Z. Maziah. 2009. *Fusarium* species in forest soil of Bird Valley. *Malaysian Journal of Microbiology* 5(2): 132-133.
- Lazreg, F., L. Belabid, J. Sánchez, E. Gallego and B. Bayaa. 2014. Pathogenicity of *Fusarium* spp. associated with diseases of Aleppo-pine seedlings in Algerian forest nurseries. *Journal of Forest Science* 60(3): 115-120.
- Leslie, J. F. and B. A. Summerell. 2006. The *Fusarium* laboratory manual. Wiley-Blackwell Publishing. Ames, IA, USA. 388 p.
- Lori, G. A. and M. I. Salerno. 2003. *Fusarium* species on seeds of *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* in Argentina. *Journal of Plant Diseases and Protection* 110(5): 437-443.
- Nelson, P. E., T. A. Toussoun and W. F. O. Marasas. 1983. *Fusarium* species: An illustrated manual for identification. Pennsylvania State University Press, University Park, PA, USA. 226 p.
- Ocamb, C. M. and J. Juzwik. 1995. *Fusarium* species associated with rhizosphere soil and diseased roots of Eastern white pine seedlings and associated nursery soil. *Canadian Journal of Plant Pathology* 17: 325-330.
- Ocamb, C. M., J. Juzwik and F. B. Martin. 2002. *Fusarium* spp. and *Pinus strobus* seedlings: root disease pathogens and taxa associated with seed. *New Forests* 24: 67-79.
- Perry, J. P. 2009. The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, OR, USA. 234 p.
- Statistical Analysis Systems (SAS). 2011. User's guide. Version 9.3. Cary, NC, USA. 2323 p.
- Torres J. J. 2003. *Patología forestal*. Mundiprensa. Madrid, España. 270 p.
- White, T. J., T. Burns, S. Lee and J. W. Taylor. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis, M. A., D. Gelfand, J. Sninsky and T. J. White (eds.), *PCR protocol: a guide to methods and application*. Academic Press, Inc., New York, NY, USA. pp. 315-322.





Artículo / Article

Rendimiento en calidad de la madera aserrada de pino

Pine lumber grade recovery as a function of log characteristics

Rolando Orozco Contreras¹, José Ciro Hernández Díaz², Juan Abel Nájera Luna³,
Pedro Antonio Domínguez Calleros⁴, José Rodolfo Goche Telles⁴,
Pablito Marcelo López Serrano² y José Javier Corral Rivas²

Resumen

Los objetivos del estudio fueron determinar el rendimiento volumétrico por clases de madera aserrada de cuatro especies de pino; evaluar diferencias significativas por clase de madera entre especies, así como la factibilidad de utilizar una función discriminante para separar las calidades de la madera aserrada (tablas), a partir de las características de la madera en rollo (trozas). El tamaño de la muestra fue de 80 trozas, 20 por cada especie. *Pinus durangensis* presentó el mayor rendimiento en madera aserrada de la clase dos y mejor con 6.56 %, seguida por *P. teocote* con 4.57 %, mientras que *P. strobiformis* tuvo solo 0.59 % de madera de esa clase. La prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas ($P < 0.05$) en el rendimiento volumétrico por clase de madera en 14 de los 25 pares de especies consideradas. *P. durangensis* y *P. strobiformis* registraron más diferencias significativas en rendimiento por clase de madera, al ser comparadas con el resto de los taxa. La función lineal discriminante clasificó de manera correcta 27, 15, 53, y 90 % de las tablas dentro de las calidades 2ª y mejor, 3ª, 4ª, y 5ª, respectivamente. Los resultados del estudio indican que la especie tiene un efecto significativo en el rendimiento por clase de madera; también se observó que es factible usar una función lineal discriminante para estimar el rendimiento de madera de pino de clase 5 en función de las características de las trozas.

Palabras clave: Bosque de pino, industria forestal, madera en rollo, productividad, rendimiento volumétrico, tablas.

Abstract

The objectives of the present study were to determine the volume of lumber yield per quality grade of four pine species, evaluate significant differences per lumber grade and assess the feasibility of using a discriminant function to separate the grade qualities of sawn wood (lumber) as a function of the round wood characteristics (logs). The sample size was 80 logs (20 of each species). *Pinus durangensis* gave the best yield of lumber with grade 2 and better, with a 6.56 %, followed by *P. teocote* (4.57), while *P. strobiformis* reached just 0.59 in that quality. The Kruskal-Wallis test encountered significant differences ($P < 0.05$) in the yield volume per quality grade in 14 of the 25 evaluated species pairs. *P. durangensis* and *P. strobiformis* are the two species with more significant differences in yield per quality grade in comparison with the rest. The discriminant linear function correctly classified the 27, 15, 53, and 90 % of the boards in the quality grades 2nd and better, 3rd, 4th and 5th, respectively. The study results indicate that the species has a significant effect in the yield per quality grade of lumber; it was also observed that it is feasible to use a discriminant linear function to estimate the lumber yield of pine of grade 5, as a function of the log's characteristics.

Key words: Pine forest, forest industry, round wood, productivity, volumetric yield, boards.

Fecha de recepción/Reception date: 6 de julio de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de agosto 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: jcorral@ujed.mx

³ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de El Salto, México.

⁴ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, México.

Introducción

La calidad de la madera se evalúa de dos formas: por sus características naturales y por la precisión de sus dimensiones (Eleotério *et al.*, 1996). Bryant (1996) menciona que el rendimiento de clases de madera aserrada obtenida de madera en rollo de una especie en particular, no es uniforme en los aserraderos de una región específica, ya que existen muchos factores que pueden influir en la proporción de cada grado o clase producida, algunos de los cuales son: calidad y tamaño de las trozas, características del material aserrado (largo y grueso), y los métodos de aserrado, desorillado y cabeceado.

Steele *et al.* (1994) y Casado (1997) afirman que las características de la troza afectan la calidad y volumen de las tablas, e identifican algunos factores como el diámetro, longitud, conicidad y longitud de la troza, que afectan los rendimientos de madera aserrada. Thomas (2008) señala que conocer con precisión aspectos sobre el tamaño, forma y localización de defectos internos de la troza es información clave para mejorar el valor y la calidad de la madera aserrada. Zhang y Lei (2006) documentan que se pueden predecir los rendimientos de madera aserrada mediante las características de los árboles obtenidas directamente en los sitios forestales, como variables predictoras. Beauregard *et al.* (2002), Liu y Zhang (2005) y Álvarez *et al.* (2010) puntualizan que el diámetro, la longitud y la conicidad de la troza son algunas de las variables que inciden en los rendimientos de madera aserrada.

Conocer el rendimiento por clase de madera aserrada obtenida de las especies comerciales y las características de las trozas que permiten hacer una discriminación de los grados o clases de madera son tareas importantes para predecir la producción de tablas de calidad en una región determinada. Esta información es muy útil en la toma de decisiones, como en la comercialización de la trocería o la estimación de la disponibilidad de madera aserrada de una cierta calidad.

Los objetivos del presente trabajo fueron determinar y evaluar diferencias significativas en el rendimiento volumétrico por clase de madera aserrada en cuatro especies de pino, y probar la factibilidad de utilizar una función discriminante para separar las calidades de las tablas en función de las características de las trozas en el noroeste del estado de Durango.

Materiales y Métodos

Datos

El estudio se realizó en la Industria Forestal Tezains, propiedad del ejido San Diego de Tezains, municipio Santiago Papasquiaro, Dgo. La empresa se localiza en la Sierra Madre

Introduction

The quality of wood is evaluated in two ways: by its natural characteristics and by the precision of its dimensions (Eleotério *et al.*, 1996). According to Bryant (1996), the yield of the quality grades of sawn lumber obtained from round wood from a particular species is not uniform in the sawmills of a specific region, as there are many factors that can influence the proportion of each grade or class of lumber produced; some of these are log size and quality, the characteristics of the sawn material (length and thickness), as well as the sawing, edging and lathing methods.

Steele *et al.* (1994) and Casado (1997) state that the characteristics of the log affect the quality and volume of the boards, and they identify certain characteristics like diameter, length, conicity and length of the log, which affect the yield of lumber. Thomas (2008) points out that accurate data of the size, shape and location of internal defects of the log are key information for improving the value and quality of the lumber. According to Zhang and Lei (2006), it is possible to predict the yield of lumber based on the characteristics of the trees, obtained directly in the forest sites, as predictive variables. Authors like Beauregard *et al.* (2002), Liu and Zhang (2005) and Álvarez *et al.* (2010) note that the diameter, length and conicity of the log are some of the variables affecting the yield of lumber.

Calculating the output based on the grade of lumber from commercial species and on the characteristics of the logs allowing discrimination between the grades or classes of wood are important tasks to predict the production of high quality boards in a particular region. This information is very useful during the decision-making processes, as well as for commercializing the logs or estimating the availability of sawn wood of a specific quality.

The objectives of the present work were to determine and evaluate significant differences in the volumetric yield by quality grade of lumber in four pine species, and to prove the feasibility of using a discriminant function to separate the qualities of the boards based on the characteristics of the logs in northwestern Durango.

Materials and Methods

Data

The study was carried out at the company named *Industria Forestal Tezains* (Tezains Forest Industry), property of the *San Diego de Tezains* ejido, in the municipality of *Santiago Papasquiaro*, Durango, whose facilities are located in the Western *Sierra Madre* in northwestern Durango. Its

Occidental, al noroeste del estado de Durango; cuenta con un aserradero con una torre principal y reaserradora (sierra cinta) de fabricación nacional marca HULMAQ®, con longitud de volantes de 59.84 pulgadas, ancho de sierras cinta de 8 pulgadas, calibre 17 (1.47 mm.), accionados por motores de 100 HP, un carro porta trozas de 3 escuadras, marca HULMAQ® con dos motores, uno de 10 HP para accionar el avance con 1 425 rpm, y un motor de 7.5 HP de 1 730 rpm para el retroceso. El equipo se complementa por una desorilladora para dimensionar en ancho (12.70-30.48 cm), un *Trimmer* semiautomático y un péndulo para dimensionar las tablas en longitud. El aserradero tiene una capacidad instalada de 120 000 pies tabla por turno de 8 horas; cuenta con 25 obreros, y el principal producto elaborado es la madera aserrada de 7/8", 5/4", 6/4" y 2".

Se analizaron 20 trozas de cada una de las siguientes especies: *Pinus durangensis* Martínez, *P. leiophylla* Schltdl. et Cham., *P. teocote* Schltdl. et Cham., y *P. strobiformis* Engelman. Este tamaño de muestra fue estimado con base en la variación del coeficiente de aserrío, considerando 95 % de confiabilidad de la media de una premuestra de 32 trozas (ocho de cada especie), a través de la fórmula utilizada por Barnes (1968):

$$n = \frac{t^2 \times CV^2}{E^2}$$

Donde:

n = Número de trozas.

t = Valor de t , para un nivel de probabilidad deseado ($n-1$) grados de libertad

CV = Coeficiente de variación (%)

E = Error de muestreo permitido (%)

Las trozas tuvieron una longitud inicial fija de 9.34 metros (30 pies) y fueron seleccionadas al azar de las áreas de corta de la anualidad 2014. Posteriormente, en el patio de almacenamiento, las trozas fueron seccionadas en longitudes de 16, 18 y 20 pies de largo, se intentó tener cierta proporcionalidad en el número de trozas por longitud entre las diferentes especies estudiadas. Posteriormente, cada troza se marcó con pintura para diferenciarlas e identificarlas, y se midieron los diámetros sin corteza en ambos extremos de cada troza.

Con la finalidad de determinar cuáles características de las trozas permiten discriminar las diferentes calidades de las tablas, se midieron, por taxón, las siguientes variables: diámetro promedio, longitud, conicidad, y calidad de la troza. Para la clasificación de la trocería de pino se utilizó la Norma Mexicana NMX-C-359-1988 (DGN, 1988), mediante la siguiente clasificación: México 1 = primera calidad; México 2 = segunda calidad; México 3 = tercera calidad; México 4 = cuarta calidad; México 5 = quinta calidad. En todos los casos,

infrastructure includes a sawmill with a main tower and a nationally manufactured HULMAQTM resaw (band saw), with a 59.84 inch long flywheel, 8 inch wide, 17 caliber (1.47 mm) band saws, powered by two 100 HP engines, a HULMAQTM three-bracket logging carriage with two engines 10 HP one to drive it forward, with 1 425 rpm, and a 7.5 HP one with 1 730 rpm to drive in reverse. This equipment is supplemented with an edger to measure the width (12.70-30.48 cm), a semi-automatic Trimmer and a pendulum to measure the length of the boards. The sawmill has an installed capacity of 120 000 board feet per 8-hour shift; it has 25 workers, and its main product is 7/8", 5/4", 6/4" and 2" lumber.

20 logs of each of the following species were analyzed: *Pinus durangensis* Martínez, *P. leiophylla* Schltdl. et Cham., *P. teocote* Schltdl. et Cham. and *P. strobiformis* Engelm. The sample size was estimated based on the variation in the sawing coefficient, with a 95 % confidence interval of the mean of a pre-sample consisting of 32 logs (eight of each species), using the formula utilized by Barnes (1968):

$$n = \frac{t^2 \times VC^2}{E^2}$$

Where:

n = Number of logs.

t = T value for a desired probability level ($n-1$) degrees of freedom

VC = Variation coefficient (%)

E = Permitted sampling error (%)

The logs had a fixed baseline length of 9.34 m (30 feet) and were selected at random from the pruning areas of the year 2014. Subsequently, logs with lengths of 16, 18 and 20 feet were chosen at the storage yard; certain proportionality in the number of logs per length among the various studied species. Each log was marked with paint in order to differentiate between species and identify these; the diameters without the bark were measured at both ends of the logs.

In order to determine the characteristics of the logs that make it possible to discriminate between the different quality grades of the boards, the following variables were considered: species, mean diameter, length, conicity and quality of the log. The Mexican Norm NMX-C-359-1988 (DGN, 1988) was utilized to classify pine logs, according to the following classification: Mexico 1 = first quality grade; Mexico 2 = second quality grade; Mexico 3 = third quality grade; Mexico 4 = fourth quality grade; Mexico 5 = fifth quality grade. In all cases, the logs must have a minimum diameter of length of 25 cm and 2.44 m, respectively. This classification was utilized because it agrees with the criteria used in the region. Table 1 shows the descriptive statistics of the analyzed logs by species.

las trozas deben tener un diámetro y longitud mínimos de 25 cm y de 2.44 m, respectivamente. Se utilizó esta clasificación debido a que coincide con los criterios utilizados en la región. En el Cuadro 1 se muestran los estadísticos descriptivos por especie de las trozas analizadas.

Afterward, the logs were debarked and sawn in a sawmill with a main band saw tower and a HULMAQ brand resaw with 1.520 m long flywheels, 20.32 cm wide and 17 caliber (1.47 mm) band saws, powered by 100 HP motors. The sawmill has a log carrier car of three squares, HULMAQ brand with two motors,

Cuadro 1. Características descriptivas de las trozas analizadas por especie en el estudio.

Especie	Diámetro (cm)		Longitud (m)		Conicidad		No. de trozas por calidad		
	Media	Std.	Media	Std.	Media	Std.	2º	3º	4º
<i>Pinus leiophylla</i> Schltld. et Cham.	33	6	5.09	0.63	0.23	0.05	5	7	8
<i>Pinus strobiformis</i> Engelman	37	10	4.88	0.84	0.25	0.07	2	8	10
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	44	10	5.00	0.55	0.31	0.07	6	11	3
<i>Pinus teocote</i> Schltld. et Cham.	34	8	4.91	0.61	0.24	0.06	2	11	7

Std = Desviación Estándar

Table 1. Descriptive characteristics of the logs analyzed in the study by species.

Species	Diameter (cm)		Length (m)		Conicity		No. of logs by quality		
	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.	2 nd	3 rd	4 th
<i>Pinus leiophylla</i> Schltld. et Cham.	33	6	5.09	0.63	0.23	0.05	5	7	8
<i>Pinus strobiformis</i> Engelman	37	10	4.88	0.84	0.25	0.07	2	8	10
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	44	10	5.00	0.55	0.31	0.07	6	11	3
<i>Pinus teocote</i> Schltld. et Cham.	34	8	4.91	0.61	0.24	0.06	2	11	7

Std= Standard Deviation

Después, se procedió con la etapa de descortezado y aserrado de las trozas, que se llevó a cabo en un aserradero con torre principal de sierra cinta y una reaserradora marca HULMAQ, con longitud de volantes de 1.520 m, ancho de las sierras cinta de 20.32 cm y calibre 17 (1.47 mm), accionados por motores de 100 HP. El aserradero cuenta con un carro porta trozas de tres escuadras, marca HULMAQ con dos motores, accionado por un motor para el avance de 10 HP y 1 425 rpm, y para el retroceso utiliza un motor de 7.5 HP y 1 730 rpm. La desorilladora permite dimensionar en ancho (12.70 - 30.48 cm), un Trimmer semiautomático y un péndulo para dimensionar las tablas, en longitud.

Una vez aserrada la madera se clasificó en las clases 2º y mejor, 3º, 4º, 5º, 6º y 7º (cortas dimensiones). Sin embargo, en este trabajo solo se estudiaron las clases 2º y mejor, 3º, 4º, 5º, debido a que fueron las que presentaron un tamaño de muestra aparentemente adecuado para los análisis estadísticos (Cuadro 2). Esta clasificación corresponde a las categorías de la Norma Mexicana NMX-C-224-ONNCCE-2001.

El grosor de las tablas aserradas fue de: 7/8", 5/4", 6/4" (2.22, 3.18 y 3.81 cm), y los tablones de 3" x 3" y 4" x 4" (7.62

powered by a one for the advance of 10 HP and 1 425 r.p.m., and for the recoil it uses a 7.5 HP motor and gets 1 730 r.p.m. The trimmer allows to dimension width (12.70 - 30.48 cm), and a semiautomatic Trimmer and a pendulum to do it in the length of the tables.

Once the timber was sawn, it was classified in to the following categories: 2nd and better, 3rd, 4th, 5th, 6th and 7th (short dimensions). However, this work studied only the 2nd and better, 3rd, 4th and 5th quality grades because these had an apparently appropriate sample size for the statistical analyses (Table 2). This classification corresponds with the categories of the Mexican Norm NMX-C-224-ONNCCE-2001.

The sawn boards were 7/8", 5/4" and 6/4" (2.22, 3.18 and 3.81 cm) thick, and broad boards were 3" x 3" and 4" x 4" (7.62 x 7.62 and 10.16 x 10.16 cm) thick. The widths of the timber ranged between 3" and 12" (10.16 a 30.48 cm), and their lengths ranged between 8' and 20' (2.4384 to 6.096 m) plus reinforcements. In order to distinguish the classified lumber yielded by each log, a control method based on marking each log with paint was applied. The information was recorded in a control format designed for this purpose.

x 7.62 y 10.16 x 10.16 cm). Los anchos de la madera variaron de 4 a 12" (10.16 a 30.48 cm), y los largos 8 a 20' (2.4384 a 6.096 m) más refuerzos. Para distinguir la madera aserrada y clasificada resultante por troza, se utilizó un método de control basado en pintura colocada en cada troza. La información se registró en un formato de control diseñado para tal efecto.

Métodos

La determinación del rendimiento de madera aserrada obtenida por clase fue mediante la relación entre el volumen de madera en rollo sin corteza en la rampa, antes del asierre y el volumen de madera aserrada por clase resultante (Aguilera *et al.*, 2005; Quirós *et al.*, 2005; Valério *et al.*, 2007). Esta relación se calculó con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{V_{ac}}{V_r} \times 100$$

Donde:

- R = Rendimiento de madera aserrada sin corteza (%)
- V_{ac} = Volumen de las tablas aserradas por clase (m³)
- V_r = Volumen de las trozas (m³ rollo)

Para evaluar diferencias significativas entre especies en el rendimiento por clase de madera, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), debido a que los datos no se distribuyeron de manera normal.

Para identificar las características que hacen posible la discriminación entre las diferentes clases o grados de madera aserrada se hizo un análisis discriminante, a través del procedimiento *DISCRIM* del sistema SAS/STAT (SAS, 2009). Dicho análisis permite la separación de conjuntos de datos con criterios excluyentes en dos o más grupos (diámetro, conicidad, calidad de la troza, etcétera.) (Khattree y Naik, 2000). La técnica consiste, esencialmente, en reconocer una regla de clasificación que maximice el cociente de grupos de varianza en relación al total de la varianza. Cuando la distribución dentro de cada grupo se asume que es normal multivariada, se puede aplicar un método paramétrico para desarrollar una función discriminante, misma que también es conocida como criterio de clasificación y que se define por medio de una medida de la distancia cuadrada generalizada (Rao, 1973).

El criterio de clasificación considera las probabilidades de separación para cada grupo, y puede usarse como la covarianza individual entre grupos (produce una función cuadrática), o como una matriz agrupada de covarianzas, con lo que se obtiene una función lineal. Cada observación se coloca en la clase, y considera el menor valor de la distancia cuadrada generalizada (SAS, 2009).

Methods

The yield of lumber obtained per quality grade was determined based on the ratio of the volume of debarked round wood on the ramp before sawing and the resulting volume of sawn wood (Aguilera *et al.*, 2005; Quirós *et al.*, 2005; Valério *et al.*, 2007). The formula used was the following:

$$R = \frac{V_{sc}}{V_r} \times 100$$

Where:

- Y = Yield of debarked lumber (%)
- V_{sc} = Volume of sawn boards by quality grade (m³)
- V_r = Log volume (m³ roll)

The evaluation of significant differences between species in the yield by lumber quality grade was carried out using the Kruskal-Wallis non-parametric test (Kruskal and Wallis, 1952), as the data were not normally distributed.

In order to identify the characteristics that discriminate between the different classes or quality grades of lumber, a discriminant analysis was carried out, using the *DISCRIM* procedure of the SAS/STAT system (SAS, 2009). The discriminant analysis allows the disaggregation of sets of data with excluding characteristics in two or more groups (diameter, conicity, and quality of the log, etc.) (Khattree and Naik, 2000). The technique consists essentially in obtaining a classification rule that will maximize the quotient of variance groups in relation to the total of the variance. When the distribution within each group is assumed to be normal multivariate, a parametric method can be used to develop a discriminant function, also known as classification criterion, and it can be determined by means of a generalized squared distance measure (Rao, 1973).

The classification criterion takes into account the probabilities of separation for each group, and can be used as the individual covariance between groups (producing a root mean square function), or as an aggregated covariance matrix (resulting in a linear function). Each observation is carried out for each class, considering the lowest value of the generalized square distance (SAS, 2009).



El análisis discriminante debe realizarse solo cuando las medias de las poblaciones resulten ser estadísticamente diferentes (Álvarez *et al.*, 2003). La instrucción MANOVA del procedimiento DISCRIM se usó para ejecutar el análisis de igualdad de medias (SAS, 2009).

La prueba de normalidad multivariada se aplicó mediante la prueba de Mardia para el sesgo y la kurtosis (Khattree y Naik, 1999), con la herramienta % MULTNORM macro del sistema SAS (SAS, 2009).

El supuesto de matriz de covarianzas comunes fue comprobado con la prueba de radio de verosimilitud en la que se especifica la instrucción POOL=TEST del procedimiento DISCRIM de SAS/STAT (SAS, 2009).

Dado que la calidad del ajuste no necesariamente refleja la calidad de la predicción, lo más deseable sería hacer una evaluación de la tasa de clasificación de la función discriminante con un conjunto independiente de datos (Myers, 1990; Wang *et al.*, 2003; Kozak y Kozak, 2003). Debido a la escasez de tales datos (una muestra independiente), se adoptó el enfoque de validación cruzada. El procedimiento consiste en dejar una observación hacia fuera y la construcción de una regla discriminante para el resto de los datos; dicha regla se utilizó para clasificar la observación que se dejó fuera; esto se repite para cada observación y se cuenta el número de observaciones erróneamente clasificadas para cada población y se calculan los índices de error individuales como las proporciones respectivas (Khattree y Naik, 2000).

El desempeño de las funciones discriminantes de los datos se evaluó con los índices de error (probabilidad de clasificación errónea) para el ajuste y la validación cruzada con el procedimiento de SAS/STAT (SAS, 2009). Las probabilidades *a priori* utilizadas fueron de 0.09, 0.23, 0.26 y 0.42 para las clases de madera 2, 3, 4 y 5, respectivamente de acuerdo a los registros de producción del aserradero.

Resultados y Discusión

Rendimiento volumétrico

El rendimiento de madera aserrada para las cuatro especies estudiadas se presenta en el Cuadro 2. *P. durangensis* presentó el mayor rendimiento en madera aserrada de la clase 2ª y mejor con 6.56 % (27.81 pies tabla por m³), seguida por *P. teocote*, con 4.57 % (19.35 pies tabla por m³). El promedio observado para los cuatro taxa estudiados fue de 3.45 % (14.61 pies tabla por m³). La producción de tablas de calidad tres en *P. leiophylla*, y *P. durangensis* mostró un rendimiento de 14.12 y 11.71 %, respectivamente. *P. teocote* y *P. strobiformis* tuvieron rendimientos volumétricos similares en madera de calidad cinco con 28.55 y 28.38 %, respectivamente.

The discriminant analysis must be performed only when the means of the populations turn out to be statistically different (Álvarez *et al.*, 2003). The MANOVA instruction of the DISCRIM procedure was utilized to carry out the equality of means analysis (SAS, 2009).

The multivariate normality test was carried out using the Mardia's test for the bias and the kurtosis (Khattree and Naik, 1999), together with the macro %MULTNORM tool of the SAS system (SAS, 2009).

The covariance matrix assumption was proved using the plausibility radius; for this purpose, the POOL=TEST instruction of the DISCRIM procedure of SAS/STAT was specified (SAS, 2009).

Since the quality of the adjustment does not necessarily reflect the quality of the prediction, an evaluation of the classification rate of the discriminant function with an independent set of data would be most desirable (Myers, 1990; Wang *et al.*, 2003; Kozak and Kozak, 2003). Because these data (an independent sample) are scarce, the cross-validation approach was adopted. This procedure consists in leaving out an observation and building a discriminant rule for the rest of the data—a rule utilized to classify the observation that was left out. This is repeated for each observation, and, finally, the number of erroneously classified observation for each population is counted, and the individual error indices are estimated in the same manner as the respective proportions (Khattree and Naik, 2000).

The performance of the discriminant functions of the data was evaluated using error indices (likelihood of erroneous classification) for the adjustment and the cross-validation with the SAS/STAT procedure (SAS, 2009). The priors utilized were 0.09, 0.23, 0.26 and 0.42 for the lumber quality grades 2, 3, 4 and 5, respectively, according to the production records of the sawmill.

Results and Discussion

Volumetric yield

The yield of lumber from the four pine species is shown in Table 2. *Pinus durangensis* had the highest lumber yield of the 2nd and better grade, with 6.56 % (27.81 board feet per m³), followed by *P. teocote*, with 4.57 % (19.35 board feet per m³). The mean for the four species was 3.45 % (14.61 board feet per m³). The yield of quality grade 3 boards of *P. leiophylla* and *P. durangensis* was 14.12 and 11.71 %, respectively. *P. teocote* and *P. strobiformis* had similar volumetric yields in lumber of quality grade 5, with 28.55 and 28.38 %, respectively.

Cuadro 2. Rendimiento volumétrico por clase de madera aserrada en porcentaje y en pies tabla por m³ obtenido en cuatro especies de pino.

Especie	Volumen de trozas (m ³)	Rendimiento	2º y mejor (%)	3º (%)	4º (%)	5º (%)	Total
<i>Pinus leiophylla</i> Schtdl. <i>et</i> Cham.	8.64	%	2.09	14.12	10.34	18.29	44.84
		Pies tabla m ⁻³	8.51	57.50	42.13	74.49	182.63
<i>Pinus strobiformis</i> Engelman	10.81	%	0.59	9.13	11.30	28.38	49.40
		Pies tabla m ⁻³	2.79	43.46	53.76	135.08	235.10
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	15.63	%	6.56	11.71	10.95	13.96	43.18
		Pies tabla m ⁻³	27.81	49.66	46.44	59.20	183.11
<i>Pinus teocote</i> Schtdl. <i>et</i> Cham.	9.23	%	4.57	8.64	10.72	28.55	52.48
		Pies tabla m ⁻³	19.35	36.64	45.45	121.03	222.47
Promedio	11.08	%	3.45	10.90	10.83	22.30	47.47
		Pies tabla m ⁻³	14.61	46.815	46.95	97.45	205.82

Table 2. Volumetric yield by quality grade in percentages and in board feet per m³ of the lumber obtained from four pine species.

Species	Log volume (m ³)	Output	2 nd and better (%)	3 rd (%)	4 th (%)	5 th (%)	Total
<i>Pinus leiophylla</i> Schtdl. <i>et</i> Cham.	8.64	%	2.09	14.12	10.34	18.29	44.84
		Board feet m ⁻³	8.51	57.50	42.13	74.49	182.63
<i>Pinus strobiformis</i> Engelman	10.81	%	0.59	9.13	11.30	28.38	49.40
		Board feet m ⁻³	2.79	43.46	53.76	135.08	235.10
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	15.63	%	6.56	11.71	10.95	13.96	43.18
		Board feet m ⁻³	27.81	49.66	46.44	59.20	183.11
<i>Pinus teocote</i> Schtdl. <i>et</i> Cham.	9.23	%	4.57	8.64	10.72	28.55	52.48
		Board feet m ⁻³	19.35	36.64	45.45	121.03	222.47
Average	11.08	%	3.45	10.90	10.83	22.30	47.47
		Board feet m ⁻³	14.61	46.815	46.95	97.45	205.82

Nájera *et al.* (2011) evaluaron el rendimiento volumétrico y la calidad dimensional de la madera de pino en cinco aserraderos de El Salto, Durango, México, y obtuvieron promedios menores a los del presente estudio, con rendimientos de 1.3 %, para la clase 2º y mejor, así como 20.4 %, para la 5ª clase.

En otro trabajo de aserrío de trocería de pino realizado por Zavala y Hernández (2000), se registró un rendimiento promedio de 12 % para la clase 2º y mejor, 18 % para la 3ª, 12 % para la 4ª y 9 % para la clase 5ª, con un rendimiento acumulado de 51 % de madera aserrada. Estos valores son mayores, lo cual se atribuye a la calidad de trocería que se manejó y a los diámetros de 30 a 55 cm (85.05 %), de 25 a 30 cm (3.44 %) y el restante 11.49 % con categoría diamétrica de 55 a 70 cm.

Nájera *et al.* (2011) assessed the volumetric yield and the dimensional quality of pine wood in five sawmills in *El Salto, Durango, Mexico*, and obtained averages below those of the present work, with yields of 1.3 % for the 2nd and better grade and 20.4 % for the 5th grade.

Another study of pine log sawmills by Zavala and Hernández (2000) shows an average yield of 12 % for the 2nd and better grade, 18 % for the 3rd grade, 12 % for the 4th grade, and 9 % for the 5th grade, with an accumulated yield of 51 % of sawn wood. These yields are higher than those of the present research, a difference that may be ascribed to the quality of the logs that were used and to their diameters, which ranged between 30 and 55 cm (85.05 %), and between 25 and 30 cm (3.44 %), while the remaining 11.49 % had diameters of 55 to 70 cm.

En la presente investigación, el rendimiento volumétrico o coeficiente de aserrío de las especies estudiadas varió de 43.18 a 52.48 %. Estos valores son comparables con los registrados por Zavala (1996) y Zavala (1981), en trabajos de aserrío de pino en Durango (40 a 53 %), y con los observados por el mismo autor años después (1987), en aserraderos de Tlaxcala en especies de pino (51 a 52 %). Sin embargo, resultaron inferiores a los de Nájera *et al.* (2012) en trozas de pino en dos aserraderos privados en la región de El Salto, Durango (61.64 %). Las diferencias pueden atribuirse, entre otros factores, a las dimensiones de las trozas (diámetro), conicidad, variaciones de la calibración, nivelación de los volantes y tensionado de la sierra cinta; así como, a la pericia del operador de la sierra cinta principal, que tiene un efecto directo en la variable mencionada.

En este estudio se utilizó una sierra cinta de 20.32 cm (8"), calibre 17, mientras que en los aserraderos citados anteriormente se usó una de 18.4 cm de ancho y calibre 16.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis se muestran en el Cuadro 3. Se identificaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en el rendimiento volumétrico por clase de madera aserrada en 14 de los 25 pares evaluados de especies. El análisis indica que *P. durangensis* tuvo el mayor rendimiento volumétrico en la calidad 2ª y mejor, en cambio a *P. strobiformis*, le correspondió el más bajo.

Por otra parte, *P. teocote* y *P. strobiformis* son los que más difieren significativamente en términos de rendimiento volumétrico por clase de madera aserrada, con respecto al resto de los pinos evaluados (9 y 8 casos, respectivamente). El bajo rendimiento de *P. strobiformis* en la clase 2ª y mejor (0.59 %) se atribuye a que en el estado de Durango esta madera es castigada, debido al color veteado rojizo característico en su albura, y ese tono es suficiente para clasificarla como 3ª, 4ª y 5ª.

Los resultados coinciden con los de Erikson *et al.* (2000) en bosques maduros del norte de Idaho, donde se verificaron diferencias en la calidad de madera entre *Pinus contorta* Douglas y *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson. En la primera, más de 65 % de madera aserrada fue de clase 2ª y mejor o selecta, mientras que en la segunda especie aproximadamente 50 % de la madera fue clasificada como de 4ª y 5ª. Los porcentajes son consistentes con el trabajo de Nocetti *et al.* (2010), quienes obtuvieron diferencias significativas entre clases de madera aserrada de seis especies maderables en Italia. En México, hasta el momento de desarrollar este trabajo, no se tenía conocimiento de experiencias que hayan evaluado diferencias en la calidad de la madera aserrada entre especies.

The volumetric yield or sawing coefficient of the studied species ranged between 43.18 % and 52.48 %. These sawing coefficients are comparable to those cited by Zavala (1996) and Zavala (1981), in researches on pine log sawmills in Durango (40 to 53 %), and to those observed by Zavala (1987) in sawmills of Tlaxcala for *Pinus* spp. (51 to 52 %). However, the estimated sawing coefficients estimated for the four pine species studied were lower than those calculated by Nájera *et al.* (2012) for pine logs in two private sawmills located in the El Salto region of Durango (61.64 %). These differences may be attributed, among other factors, to differences in log size (diameter), conicity, or variations in the calibration, the leveling of the flywheels, and the tightening of the band saw, as well as to the expertise of the operator of the main band saw, which has a direct effect on the sawing coefficient.

In this work, a of 20.32 cm (8") wide, 17 caliber band saw was utilized, whereas the previously mentioned sawmills used a 18.4 cm wide, 16 caliber band saw.

Table 3 shows the results of the Kruskal-Wallis test. Significant differences ($P < 0.05$) were estimated for the volumetric yield by lumber quality grade between 14 of the 25 evaluated species pairs. The analysis indicates that *P. durangensis* had the highest volumetric yield for the 2nd and better quality grade; in contrast, *P. strobiformis* had the lowest volumetric yield.

On the other hand, *P. teocote* and *P. strobiformis* are the species with the most significant differences in terms of volumetric yield by sawn wood class in regard to the rest of the studied species (9 and 8 cases, respectively). The low yield registered for *P. strobiformis* in the 2nd and better grade (0.59 %) is ascribed to the fact that in the state of Durango this wood is "penalized" due to the reddish graining of its sapwood, which is enough to classify it under the 3rd, 4th, and 5th grade.

The results coincide with those obtained by Erikson *et al.* (2000) in aged forests of northern Idaho, where differences in wood quality were found between *Pinus contorta* Douglas and *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson. More than 65 % of the sawn wood of the former species was rated as 2nd and better grade or as select, while approximately 50 % of the lumber of the latter species was rated 4th and 5th grade. These values are consistent with those obtained by Nocetti *et al.* (2010), who found significant differences between the classes of lumber of six timber-yielding species in Italy. In Mexico, to the date of the present study, no researches assessing the differences in lumber were found between taxa.



Cuadro 3. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis de las comparaciones de las cuatros especies evaluadas.

Clase de madera	Comparación (valor entre paréntesis)	H	Pr> H
2º	<i>P. strobiformis</i> (6.50) - <i>P. leiophylla</i> (12.04)	4.42	0.035
2º	<i>P. durangensis</i> (41.86) - <i>P. leiophylla</i> (39.37)	0.11	0.737
2º	<i>P. leiophylla</i> (13.87) - <i>P. teocote</i> (18.07)	1.51	0.218
2º	<i>P. strobiformis</i> (15.57) - <i>P. durangensis</i> (41.34)	8.49	0.003
2º	<i>P. strobiformis</i> (6.42) - <i>P. teocote</i> (16.65)	8.69	0.003
2º	<i>P. durangensis</i> (42.28) - <i>P. teocote</i> (56.75)	4.79	0.026
3º	<i>P. strobiformis</i> (59.81) - <i>P. leiophylla</i> (67.07)	1.25	0.262
3º	<i>P. durangensis</i> (83.26) - <i>P. leiophylla</i> (86.50)	0.17	0.675
3º	<i>P. leiophylla</i> (72.25) - <i>P. teocote</i> (52.10)	9.79	0.002
3º	<i>P. strobiformis</i> (76.02) - <i>P. durangensis</i> (87.95)	2.40	0.120
3º	<i>P. strobiformis</i> (67.97) - <i>P. teocote</i> (54.80)	4.29	0.038
3º	<i>P. durangensis</i> (92.76) - <i>P. teocote</i> (64.70)	13.32	0
4º	<i>P. strobiformis</i> (54.87) - <i>P. leiophylla</i> (54.03)	0.19	0.888
4º	<i>P. durangensis</i> (67.57) - <i>P. leiophylla</i> (55.66)	3.20	0.073
4º	<i>P. leiophylla</i> (63.11) - <i>P. teocote</i> (54.33)	1.96	0.161
4º	<i>P. strobiformis</i> (58.80) - <i>P. durangensis</i> (76.94)	7.11	0.007
4º	<i>P. strobiformis</i> (71.78) - <i>P. teocote</i> (57.02)	5.28	0.021
4º	<i>P. durangensis</i> (88.05) - <i>P. teocote</i> (54.61)	23.39	0.001
5º	<i>P. strobiformis</i> (136.96) - <i>P. leiophylla</i> (125.60)	1.31	0.251
5º	<i>P. durangensis</i> (107.63) - <i>P. leiophylla</i> (80.79)	11.47	0
5º	<i>P. leiophylla</i> (94.25) - <i>P. teocote</i> (121.40)	9.82	0.002
5º	<i>P. strobiformis</i> (123.83) - <i>P. durangensis</i> (155.11)	10.01	0.002
5º	<i>P. strobiformis</i> (138.57) - <i>P. teocote</i> (166.60)	7.61	0.006
5º	<i>P. durangensis</i> (116.94) - <i>P. teocote</i> (108.22)	1.01	0.314

Table 3. Results of the Kruskal-Wallis test comparing the four evaluated species.

Wood class	Comparison (value in parentheses)	H	Pr> H
2 nd	<i>P. strobiformis</i> (6.50) - <i>P. leiophylla</i> (12.04)	4.42	0.035
2 nd	<i>P. durangensis</i> (41.86) - <i>P. leiophylla</i> (39.37)	0.11	0.737
2 nd	<i>P. leiophylla</i> (13.87) - <i>P. teocote</i> (18.07)	1.51	0.218
2 nd	<i>P. strobiformis</i> (15.57) - <i>P. durangensis</i> (41.34)	8.49	0.003
2 nd	<i>P. strobiformis</i> (6.42) - <i>P. teocote</i> (16.65)	8.69	0.003
2 nd	<i>P. durangensis</i> (42.28) - <i>P. teocote</i> (56.75)	4.79	0.026
3 rd	<i>P. strobiformis</i> (59.81) - <i>P. leiophylla</i> (67.07)	1.25	0.262
3 rd	<i>P. durangensis</i> (83.26) - <i>P. leiophylla</i> (86.50)	0.17	0.675
3 rd	<i>P. leiophylla</i> (72.25) - <i>P. teocote</i> (52.10)	9.79	0.002
3 rd	<i>P. strobiformis</i> (76.02) - <i>P. durangensis</i> (87.95)	2.40	0.120

Continue Table 3...

Continue Table 3..

Wood class	Comparison (value in parentheses)	H	Pr> H
3 rd	<i>P. strobiformis</i> (67.97) - <i>P. teocote</i> (54.80)	4.29	0.038
3 rd	<i>P. durangensis</i> (92.76) - <i>P. teocote</i> (64.70)	13.32	0
4 th	<i>P. strobiformis</i> (54.87) - <i>P. leiophylla</i> (54.03)	0.19	0.888
4 th	<i>P. durangensis</i> (67.57) - <i>P. leiophylla</i> (55.66)	3.20	0.073
4 th	<i>P. leiophylla</i> (63.11) - <i>P. teocote</i> (54.33)	1.96	0.161
4 th	<i>P. strobiformis</i> (58.80) - <i>P. durangensis</i> (76.94)	7.11	0.007
4 th	<i>P. strobiformis</i> (71.78) - <i>P. teocote</i> (57.02)	5.28	0.021
4 th	<i>P. durangensis</i> (88.05) - <i>P. teocote</i> (54.61)	23.39	0.001
5 th	<i>P. strobiformis</i> (136.96) - <i>P. leiophylla</i> (125.60)	1.31	0.251
5 th	<i>P. durangensis</i> (107.63) - <i>P. leiophylla</i> (80.79)	11.47	0
5 th	<i>P. leiophylla</i> (94.25) - <i>P. teocote</i> (121.40)	9.82	0.002
5 th	<i>P. strobiformis</i> (123.83) - <i>P. durangensis</i> (155.11)	10.01	0.002
5 th	<i>P. strobiformis</i> (138.57) - <i>P. teocote</i> (166.60)	7.61	0.006
5 th	<i>P. durangensis</i> (116.94) - <i>P. teocote</i> (108.22)	1.01	0.314

Análisis discriminante

El valor exacto del estadístico F de la prueba Lambda de Wilks para probar la hipótesis de igualdad de medias fue de 7.49 (valor de $p < 0.0001$); por lo tanto, se asumió que las medias poblacionales de las calidades de madera son estadísticamente diferentes. Por otro lado, la prueba de Mardia arrojó probabilidades para el sesgo de 0.056, 0.27, 0.032, y 0.13; en cambio, para la kurtosis de 0.67, 0.85, 0.58 y 0.82, en las clases 2^a, 3^a, 4^a, y 5^a, respectivamente; por ello, se considera aceptable la hipótesis de normalidad multivariada.

Dado que el valor de Chi-Cuadrada (25.03) obtenido en la prueba de igualdad de matrices de covarianza fue significativa al nivel de 0.01 (valor de $p < 0.01$), las matrices de covarianza para las cuatro calidades de madera se consideraron diferentes dentro de la función discriminante.

Los resultados de la función lineal discriminante se resumen en el Cuadro 4. De acuerdo con los resultados, de la validación cruzada, la función lineal discriminante clasificó de manera correcta el 27, 15, 53, y 90 % de las observaciones dentro de las calidades 2^a y mejor, 3^a, 4^a, y 5^a, respectivamente, utilizando a la calidad de troza y al diámetro promedio como variables predictivas o independientes. Un comportamiento semejante se observó en los resultados del ajuste, que sugieren que la función discriminante hace posible separar la madera de clase 5^a con una confiabilidad muy aceptable (Figura 1). Para la clasificación del resto de clases de madera, el modelo debe usarse con precaución o evitar su empleo, ya que la precisión de la función lineal discriminante

Discriminant analysis

The exact value of the F statistic of the Wilks Lambda test to prove the mean equality hypothesis was 7.49 (p value < 0.0001); thus, it was assumed that the population means of the wood qualities are statistically different. On the other hand, the Mardia test yielded probabilities for the bias of 0.056, 0.027, 0.032, and 0.13 and for the kurtosis of 0.67, 0.85, 0.58 and 0.82, in the 2nd, 3rd, 4th, and 5th classes, respectively. Therefore, the hypothesis of multivariate normality is considered acceptable.

Because the Chi-Square value (25.03) obtained in the equality of covariance matrices test was significant at the level of 0.01 (p value < 0.01), the covariance matrices for the four wood qualities were considered to be different within the discriminant function.

Table 4 shows the values of the discriminant linear function. According to the cross-validation, the discriminant linear function correctly classified 27, 15, 53, and 90 % of the observations as of 2nd and better, 3rd, 4th and 5th grade, respectively, when the log quality and mean diameter were used as predictive or independent variables. A similar behavior was observed in the results of the adjustment. This suggests that the discriminant function can be utilized to separate the 5th grade lumber with a very acceptable level of reliability (see aggregation of observations for the 5th quality grade in Figure 1). In order to classify the remaining lumber quality grades, the model must be either used with caution or avoided altogether, as the precision of the discriminant linear function turned out not to be sufficiently adequate, especially for separating the 2nd and better grade from the 3rd grade.

resultó no ser suficientemente precisa, en particular para separar las clases 2ª y mejor y 3ª.

Resultados similares fueron identificados por Zavala y Hernández (2000), quienes registraron una relación directa entre la calidad de las trozas y la calidad de la madera aserrada de seis especies de pino en un aserradero de San Pedro El Alto, Zimatlán, Oax. También son consistentes con los de Breinig *et al.* (2015), autores que documentan buenos ajustes para algunas clases de tablas, a través de una función lineal discriminante, mientras que para otras clases se observaron desviaciones considerables.

La baja confiabilidad del modelo para la discriminación de estas clases estaría asociada a los bajos rendimientos de madera aserrada producidos por la muestra evaluada (3 y 10 %, respectivamente), por lo que, el tamaño de muestra utilizado para estas clases pudo ser insuficiente, y por tanto, se recomienda que en futuros trabajos se pruebe el modelo con un tamaño de tablas mayor a estas dos clases. Además, las diferencias significativas observadas en el rendimiento volumétrico por clase de madera aserrada, mediante la prueba de Kruskal-Wallis indicaría la necesidad de emplear una función discriminante de manera separada para cada especie (Craig *et al.*, 2005).

Similar results are documented by Zavala and Hernández (2000), who registered a direct relationship between log quality and the quality of the sawn wood of six pine species in a sawmill in *San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca*. These results are also consistent with those of Breinig *et al.* (2015), who obtained good adjustments for the classification of certain board quality grades using a discriminant linear function, while major deviations were observed for other grades.

The low reliability of the model for discrimination between these grades may be associated to the low yield of lumber produced by the assessed sample (3 % and 10 %, respectively): the sample size used for these classes may have been insufficient. Therefore, in future researches it is recommended to try the model with a larger board size for these two lumber quality grades. Also, the significant differences observed in the volumetric yield per grade of lumber in the studied species with the Kruskal-Wallis test would indicate the need to use the discriminant function separately for each species (Craig *et al.*, 2005).



Cuadro 4. Porcentaje de madera clasificada dentro de cada clase a través del uso de la función lineal discriminante.

Clase de madera	Porcentaje de predicción por clase obtenida en el ajuste				Porcentaje de predicción por clase obtenida en la validación cruzada			
	2ª y mejor	3ª	4ª	5ª	2ª y mejor	3ª	4ª	5ª
2ª y mejor	33.3	13.3	33.3	20.0	26.7	13.3	33.3	26.7
3ª	10.0	20.0	30.0	40.0	15.0	15.0	30.0	40.0
4ª	50.3	10.5	57.9	26.3	5.3	15.8	52.6	26.3
5ª	0	0	10	90	0	0	10.0	90.0

Table 4. Percentage of classified lumber within each grade using the discriminant linear function.

Lumber quality grade	Percentage of prediction by grade obtained in the adjustment				Percentage of prediction by grade obtained in the cross-validation			
	2 nd and better	3 rd	4 th	5 th	2 nd and better	3 rd	4 th	5 th
2 nd and better	33.3	13.3	33.3	20.0	26.7	13.3	33.3	26.7
3 th	10.0	20.0	30.0	40.0	15.0	15.0	30.0	40.0
4 th	5.3	10.5	57.9	26.3	5.3	15.8	52.6	26.3
5 th	0	0	10.0	90.0	0	0	10.0	90.0



El Cuadro 5 muestra la estimación de los parámetros de la función lineal discriminante para las cuatro clases de madera aserrada.

Cuadro 5. Estimación de los parámetros de las funciones lineales discriminantes.

Clase de madera aserrada	Inicio	CT	DP
2ª y mejor	-39.405	13.973	0.886
3ª	-39.509	15.438	0.823
4ª	-38.145	15.708	0.766
5ª	-47.999	18.389	0.821

CT = Calidad de la troza; DP = Diámetro promedio.

El uso de la función discriminante para la clasificación de una tabla dentro de alguna de las clases estudiadas se basa en la siguiente ecuación, resuelta por clase de madera aserrada:

$$D_i = b_{i0} + b_{i1}X_1 + b_{i2}X_2$$

Donde:

- D_i = Porcentaje de discriminación calculada para la clase de madera de la tabla
- i, X_1 y X_2 = Variables predictivas (calidad de troza y diámetro promedio, respectivamente)
- $b_{i0}..b_i$ = Valores estimados de los parámetros de la función lineal discriminante para la clase de madera i (Cuadro 4). Cada observación se asigna al grupo con el valor máximo de D_i

La Figura 1 ilustra una expresión gráfica de la función discriminante y muestra que los valores medios de las variables calidad y diámetro promedio de la troza pueden usarse para clasificar una nueva tabla dentro de una de las cuatro clases de madera estudiadas, principalmente, la función discriminante funciona bien para la madera de clase 5ª.

Table 5 shows the estimated parameters of the discriminant linear function for the four lumber quality grades.

Table 5. Estimation of the parameters of the discriminant linear functions.

Lumber quality grade	Start	LQ	MD
2 nd and better	-39.405	13.973	0.886
3 rd	-39.509	15.438	0.823
4 th	-38.145	15.708	0.766
5 th	-47.999	18.389	0.821

LQ = Log quality; MD = Mean diameter.

The use of the discriminant function for the classification of a board of one of the studied grades is based on the following equation, solved by lumber quality grade:

$$D_i = b_{i0} + b_{i1}X_1 + b_{i2}X_2$$

Where:

- D_i = Discrimination percentage estimated for the lumber quality grade of the board
- i, X_1 and X_2 = Predictive variables (log quality and mean diameter, respectively)
- $b_{i0}..b_i$ = Estimated values of the parameters of the discriminant linear function for the lumber quality grade i (Table 4). Each observation is assigned to the group with the maximum D_i value

Figure 1 illustrates a graphic expression of the discriminant function and shows that the average values of the log quality and mean diameter variables can be utilized to classify a new board within one of the four studied lumber quality grades; the discriminant function works well mainly for the 5th lumber grade.



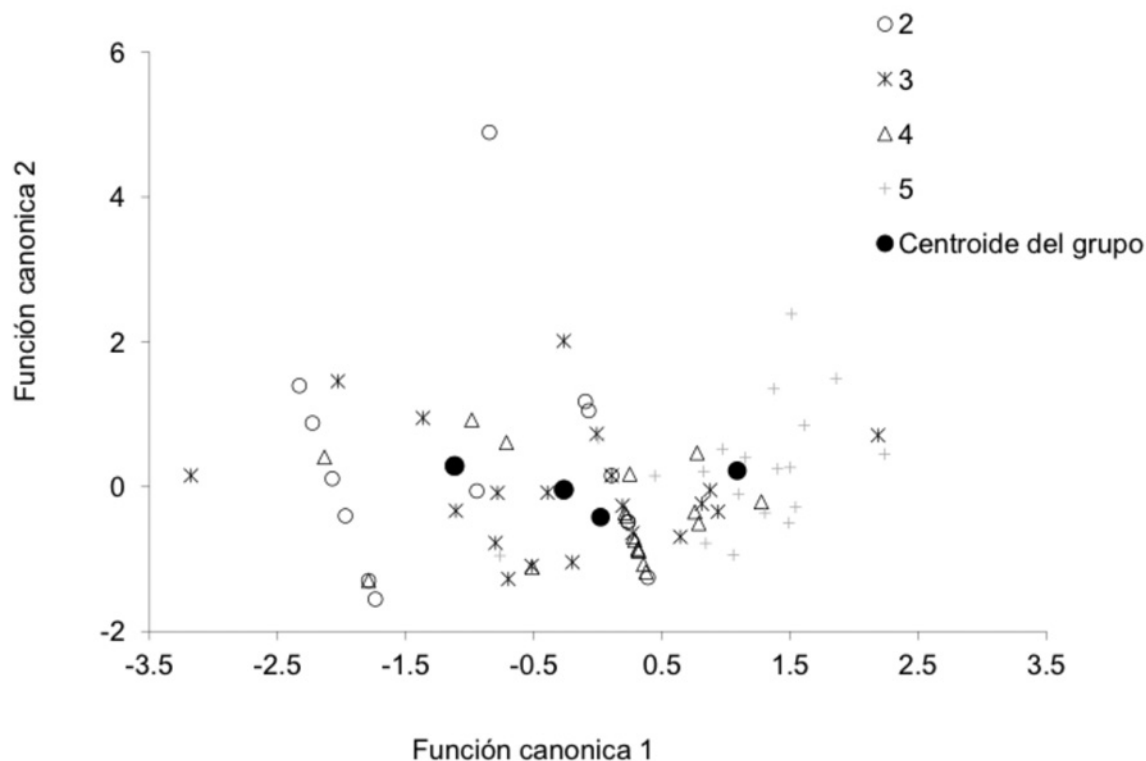


Figura 1. Clasificación gráfica de tablas de pino mediante la función lineal discriminante.

Figure 1. Graphic classification of the pine boards using the discriminant function.

Conclusiones

Pinus durangensis registró el mayor rendimiento de madera aserrada de clase 2ª y mejor, mientras que *Pinus strobiformis* obtuvo el más bajo. La especie tuvo un efecto significativo en el rendimiento por clase de madera. Las variables calidad y diámetro promedio de trozas de pino resultaron buenos predictores de tablas de calidad 5ª, dentro de una función lineal discriminante. La baja confiabilidad del modelo discriminante para separar las clases 2ª y mejor y 3ª, podría estar asociada con la poca abundancia de tablas de estas dos calidades.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Conacyt por el apoyo financiero (105524) proporcionado para estudiar en el programa Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales (DICAF). Las observaciones de un revisor anónimo contribuyeron a mejorar significativamente la versión final de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Conclusions

Pinus durangensis showed the highest yield of lumber of the 2nd and better lumber quality grade, while *P. strobiformis* had the lowest yield. The pine species had a significant effect on the yield by lumber grade. The log quality and mean diameter variables turned out to be good predictors for boards of the 5th grade, within a discriminant linear function. It is advisable to study the effect of the sample size by lumber grade, as the low reliability of the discriminant model obtained for separating the 2nd and better grade from the 3rd grade may be associated to the scarce abundance of boards of these two quality grades.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to Conacyt for the financial support (105524) provided for studying the *Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales* (DICAF). The observations by an anonymous reviewer contributed to significantly improve the final version of this paper.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



Contribución por autor

Rolando Orozco Contreras: conceptualizó el diseño de la investigación y la selección del sitio, recolección de los datos de campo, así como su procesamiento y análisis, elaboración del manuscrito; José Ciro Hernández Díaz: diseño de la investigación y escritura del documento; Juan Abel Nájera Luna: discusión de los resultados; Pedro Antonio Domínguez Calleros: diseño de la investigación y escritura del documento; José Rodolfo Goche Telles: diseño de la investigación y colaboración en la escritura del manuscrito; Pablito Marcelo López Serrano: análisis estadístico y escritura del manuscrito; José Javier Corral Rivas: asistencia para el diseño de la investigación, análisis estadístico y escritura del documento.

Referencias

Aguilera, A., L. Inzunza, R. Alzamora y L. Tapia. 2005. Evaluación del costo de producción para faenas de aserrío portátil. *Bosque* 26(2):107-114.

Álvarez, D., F. A. Egas, I. Estévez, P. Chávez y J. M. García. 2003. Análisis matemático para elevar la eficiencia en los aserraderos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9(1):89-94.

Álvarez, D., I. Estévez, A. Domínguez, O. García, J. Alaejos and J. C. Rodríguez. 2010. Improvement of the lumber recovery factory with low environmental impact in Pinar del Río, Cuba. *The International Forestry Review* 12(5): 303.

Barnes, R. 1968. *Motion and time study: design and measurement of work*. John Wiley & Sons. New York, NY, USA. 799 p.

Beauregard, R. L., R. Gazo, and R. D. Ball. 2002. Grade Recovery, Value, and Return-to-Log for the Production of NZ Visual Grades (Cuttings and Framing) and Australian Machine Stress Grades. *Wood and Fiber Science* 34(4): 455-502.

Breinig, L., R. Leonhart, O. Broman, A. Manuel, F. Brüchert and G. Becker. 2015. Classification of wood surfaces according to visual appearance by multivariate analysis of wood feature data. *Journal of Wood Science*. 61(2): 89-112. Doi:10.1007/s10086-014-1410-6.

Bryant, R. C. 1996. *Lumber, its manufacture and distribution*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA 535 p.

Casado, M. M. 1997. *Tecnología de las industrias forestales. Tomo I. Serie Forestal 26*. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Valladolid, España. 191 p.

Craig, T. B., P. H. Steele and V. O. Harding. 2005. Accelerated statistical prediction of lumber grades and part yields. *Forest Products Journal* 55(7-8):28-34.

Dirección General de Normas (DGN). 1988. Norma Mexicana NMX-C-359 - 1988. *Industria Maderera - Trocería de Pino - Clasificación*. DGN. SECOFI. México, D. F., México. 23 p.

Eleotério, J., R. L. Storck y S. J. Lopes. 1996. Caracterização de peças de madeira produzidas em serraria visando o controle de qualidade. *Ciencia Florestal* 6(1):89-99.

Erikson, R. G., T. M. Gorman, D. W. Green and D. Graham. 2000. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal* 50(7-8): 59-65.

Kozak, A. and R. Kozak. 2003. Does cross-validation provide additional information in the evaluation of the regression models? *Canadian Journal of Forest Research* 33: 976-987.

Khattree, R. and D. N. Naik. 1999. *Applied multivariate statistics with SAS software*. SAS Institute. Cary, NC and J. Wiley & Sons. New York, NY, USA. 338 p.

Khattree, R. and D. N. Naik. 2000. *Multivariate data reduction and discrimination with SAS® Software*. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 558 p.

Kruskal W. H. and W. Wallis A. 1952. Source: *Journal of the American Statistical Association* 47(260): 583- 621.

Liu, C. and S. Y. Zhang. 2005. Models for predicting product recovery using selected tree characteristics of black spruce. *Canadian Journal Forest Resources* 35: 930-937.

Contribution by author

Rolando Orozco Contreras: design of the research and site location, field data collection, their processing and analysis, writing of the manuscript; José Ciro Hernández Díaz: design of the research and writing of the manuscript; Juan Abel Nájera Luna: discussion of results; Pedro Antonio Domínguez Calleros: design of the research and writing of the manuscript; José Rodolfo Goche Telles: design of the research and support in writing of the manuscript; Pablito Marcelo López Serrano: statistical analysis and writing of the manuscript; José Corral Rivas: help in the design of the research, statistical analysis and writing of the manuscript.

End of the English version

Myers, R. H. 1990. *Classical and modern regression with applications*. Duxbury Press. Belmont, CA, USA. 488 p.

Nájera L., J. A., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G., J. Jiménez P., E. Jurado Y., J. J. Corral R. y B. Vargas L. 2011. Rendimiento volumétrico y calidad dimensional de la madera aserrada en aserraderos de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(4): 75-89.

Nájera L., J. A., G. H. Adame V., J. Méndez G., B. Vargas L., F. Cruz C., F. J. Hernández C. y G. Aguirre C. 2012. Rendimiento de la madera aserrada en dos aserraderos privados de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* (55): 11-23.

Nocetti, M., M. Bacher, M. Brunetti, A. Crivellaroand and J. W. G. van de Kuilen. 2010. Machine grading of Italian structural timber: preliminary results on different wood species. *Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree. Sesto Fiorentino, FI, Italy*. 8 p.

Quirós, R., O. Chinchilla y M. Gómez. 2005. Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense* 29(2): 7-15.

Rao, C. R. 1973. *Linear statistical inference and its applications*. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA. 656 p.

Statistical Analysis System (SAS). 2009. *SAS/STAT® 9.2 Users Guide. 2nd edition*. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 7869 p.

Steele, P. H., T. E. G. Harless, F. G. Wagner, L. Kumar and F. W. Taylor. 1994. Increased lumber value from optimum orientation of internal defects with respect to sawing pattern in hardwood sawlogs. *Forest Products Journal* 44(3): 69-72.

Thomas, E. 2008. Predicting internal Yellow-Poplar log defect features using surface indicators. *Wood and Fiber Science* 40(1): 14 - 22.

Valério, Á. F., L. F. Watzlawick, R. T. Dos Santos, C. Brandeleroand e H. Koehler. 2007. Quantificação de resíduos e rendimento no desdobro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze. *Floresta* 37(3):387-397.

Wang, S. Y., Ch. J. Linand Ch. and M. Chiu. 2003. Effects of thinning and pruning on knots and lumber recovery of Taiwania (*Taiwania cryptomerioides*) planted in the Lu-Kuei area. *Journal of Wood Science* 49:444-449.

Zavala Z., D. 1981. *Analysis of the sawmilling practices in the State of Durango, México*. Thesis of Master of Science. The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. 91 p.

Zavala Z., D. 1987. Análisis del coeficiente de aprovechamiento en dos aserraderos del Estado de Tlaxcala. *Reunión de Investigación Forestal y Agropecuaria de Tlaxcala. Inifap. CIFAPTILAX. Tlaxcala, Tlax., México*. pp. 52-62.

Zavala, D. 1996. Coeficiente de aprovechamiento de trocería de pino en aserraderos banda. *Revista Ciencia Forestal en México* 21(79):165-181.

Zavala Z., D. y C. R. Hernández. 2000. Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques* 6(2):41-55.

Zhang, S. Y. and Y. Lei. 2006. Modelling the relationship of tree- level product value with tree characteristics in Black Spruce. *Forest Chronicle* 82(5): 690-699.



Artículo / Article

Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios

Biomass in bushes, weeds and on the forest floor as a risk factor of fires

Jorge Hernández García¹, Gerardo Rodríguez Ortíz², José Raymundo Enríquez del Valle², Gisela Virginia Campos Ángeles² y Adán Hernández Hernández³

Resumen

El presente estudio destaca la importancia de generar información de los combustibles forestales para determinar el riesgo de incendio en bosques de pino, de encino y mesófilo de montaña en San Antonio, Chimalapa, Oaxaca. Su objetivo consistió en calcular el contenido de biomasa aérea en los diferentes componentes encontrados en el piso forestal de tres tipos de vegetación, bajo índice de riesgo de incendio. Durante 2014, se establecieron de manera dirigida 15 sitios de 1 000 m², y subsitios de 9 y 1 m² para evaluar los compartimentos de madera, hojarasca, necromasa, arbusto y herbácea; se determinaron índices de riesgo por tipo de vegetación. La información se validó mediante análisis de varianza y pruebas de medias (Duncan, 0.05), bajo un diseño completamente aleatorizado. Los contenidos de biomasa en el piso forestal fueron de 8.77 t ha⁻¹ para el bosque mesófilo de montaña, de 15.23 t ha⁻¹ para bosque de encino y de 11.07 t ha⁻¹ para bosque de pino. La biomasa contenida en herbáceas fue superior ($p = 0.009$) en el pinar, en comparación con los otros tipos de vegetación; sin embargo, al ponderar la carga total de combustible en el piso forestal, resultó entre 2.0 y 2.59 t ha⁻¹, lo cual indica que el índice de riesgo de incendio forestal en el área de estudio es bajo; en el bosque mesófilo de montaña se registró el valor más alto.

Palabras clave: Bosque de encino, bosque de pino, bosque mesófilo de montaña, carga combustible forestal, compartimentos de materia seca, Oaxaca.

Abstract

The present study highlights the importance of generating information on forest fuels to determine the risk of forest fire in pine, oak and montane cloud forests in *San Antonio, Chimalapa, Oaxaca*. Its purpose was to calculate the content of aboveground biomass in the various components found on the forest floor of three vegetation types, at risk of fire. In the course of the year 2014, fifteen 1 000 m² sites and nine 1 m² subsites were established under supervision, in order to assess the wood, dead leaves, necromass, bushes and weeds compartments. The risk rates were determined by vegetation type. The information was validated using variance analysis and mean tests (Duncan, 0.05), under a fully randomized design. The biomass contents of the forest floor were 8.77 t ha⁻¹ for the montane cloud forest, 15.23 t ha⁻¹ for the oak forest, and 11.07 t ha⁻¹ for the pine forest. The biomass content of the weeds was higher ($p = 0.009$) in the pine forest than in other vegetation types. However, the total fuel load of the forest floor turned out to be between 2.0 and 2.59 t ha⁻¹, which indicates that the risk of fire in study area is low; in contrast, the montane cloud forest had the highest risk rate.

Key words: Oak forest, pine forest, montane cloud forest, forest fuel load, dry matter compartments, Oaxaca.

Fecha de recepción/ Reception date: 27 de abril de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 19 de junio de 2016.

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). México.

² División de Estudios de Posgrado e Investigación-ITVO. México. Correo-e: grodriguez.itvo@yahoo.com

³ Campo Experimental Valles Centrales, CIR- Pacífico Sur. INIFAP. México.

Introducción

Los incendios forestales son producto de las condiciones climatológicas, especialmente de sequías prolongadas, de la gran cantidad de material combustible acumulado y de un factor de ignición natural (rayos y vulcanismo) o humano, cuando son provocados (Estrada y Ángeles, 2007). Por ello es importante comprender los mecanismos que controlan los regímenes propios de estos siniestros (Zinck *et al.*, 2011; Rodríguez, 2012).

El combustible forestal es uno de los principales elementos involucrados en la ocurrencia de esos fenómenos y es un factor determinante para definir el riesgo del evento, ya que el grado de peligro está en función de la cantidad y del tipo de material susceptible de quemarse presente en cada una de las áreas boscosas (Rentería *et al.*, 2005).

Por su localización, la región de Los Chimalapas tiene en su mayor parte climas cálido, templado, húmedo, subhúmedo, cálido húmedo, semicálido subhúmedo, templado subhúmedo, lo que se debe a su relieve con pronunciadas diferencias de altitud (200 a 2 000 m), orientación y topografía. Su temperatura media anual fluctúa entre 22 a 24 °C y los valores medios de precipitación de 200 a 2 000 mm anuales (Rodríguez, 2014). Por otra parte, es un complejo mosaico de tipos de vegetación, que acentúa el valor biológico de la zona, y es considerada un área rica en biodiversidad y con un elevado índice de endemismos potenciales (Contreras, 2009). Destacan los siguientes tipos de vegetación: selva alta, mediana y baja; chaparrera; bosque mesófilo de montaña; bosque de pino, pino-encino y encino (Rojas y Ríos, 2012).

Las causas más frecuentes de los incendios forestales en los Chimalapas, Oaxaca son de origen antropogénico: actividades agropecuarias, quemas intencionales, cacería y problemas agrarios, mientras que un bajo porcentaje son atribuidos a causas naturales (rayos) (Grupo Mesófilo A. C., 2006). En la región el impacto ha sido cada vez mayor en los últimos años, el más crítico de los cuales fue en 1998, cuando se registraron 77 incendios que afectaron 210 564 ha (Anta y Plancarte, 2001). En el municipio San Miguel Chimalapa, la extensión dañada fue de 37 806 ha y se identificaron sitios con especial efecto, de los cuales sobresalen el bosque mesófilo, el bosque de coníferas y el de encinos (Asbjornsen y Gallardo, 2004).

La acción antropogénica y el cambio climático han alterado el régimen del fuego en varios ecosistemas forestales, por lo que se hace necesario conocer las cargas de combustibles (biomasa), ya que es el único factor del triángulo del fuego que se puede manipular (Rubio *et al.*, 2016). Esta información permite implementar estrategias de manejo de los materiales susceptibles de quemarse, orientadas a su reducción y con ello, disminuir el riesgo de conflagraciones catastróficas (Chávez

Introduction

Forest fires are a product of the climate conditions, mainly of long draughts, of the great amount of accumulated combustible material, and of a natural (lightning and volcanism) or, when induced, a human ignition factor (Estrada and Ángeles, 2007). For this reason it is important to understand the mechanisms controlling the regimens of these accidents (Zinck *et al.*, 2011; Rodríguez, 2012).

Forest fuel is one of the main elements involved in the occurrence of these phenomena and a key factor for determining the risk of the event, as the degree of hazard is in terms of the amount and the type of combustible material present in each of the forest areas (Rentería *et al.*, 2005).

Because of its location, the *Los Chimalapas* region has mostly warm, temperate, humid, subhumid, warm humid, semiwarm subhumid and temperate subhumid climates; this is due to its relief with pronounced differences in altitude (200 to 2 000 m), orientation and topography. In this area the mean annual temperature ranges between 22 and 24 °C, and the mean annual precipitation is between 200 and 2 000 mm (Rodríguez, 2014). On the other hand, it is a complex mosaic of vegetation types, which enhances the biological value of the area, considered to be rich in biodiversity and to have a high rate of potential endemism (Contreras, 2009). The main types of vegetation are: high, medium and low rain forests, bush, montane cloud forest, and pine, oak and pine-oak forests (Rojas and Ríos, 2012).

The most frequent causes of forest fires in the *Los Chimalapas* region, *Oaxaca*, are anthropogenic: agricultural and livestock breeding activities, intentional burnings, hunting and agrarian problems, while a low percentage of fires are attributed to natural causes (lightning) (Grupo Mesófilo A. C., 2006). In these territories, the impact has been increasingly greater in the last few years; it was most critical in 1998, when reportedly 77 fires affected 210 564 ha (Anta and Plancarte, 2001). In the municipality of *San Miguel Chimalapa*, the damaged area was 37 806 ha, and particularly affected areas were located, notably in the montane cloud, conifer and oak forests (Asbjornsen and Gallardo, 2004).

The anthropogenic action and climate change have altered the fire regimen in various forest ecosystems; therefore, the fuel loads (biomass) must be estimated, as they are the only factor in the fire triangle that can be manipulated (Rubio *et al.*, 2016). This information makes it possible to implement strategies for the management and reduction of those materials that can burn in order to diminish the risk of catastrophic fires (Chávez *et al.*, 2016). Also, the longer the forest fire interval, the more fuel will be accumulated, and therefore, the impact of a fire on these ecosystems will be greater (Xelhuantzi *et al.*, 2011).

et al., 2016); asimismo, conforme el intervalo de los incendios forestales es mayor, se acumula más combustible y, por lo tanto, el alcance de un incendio será más importante (Xelhuantzi *et al.*, 2011).

Por otra parte, la cantidad y calidad de los combustibles superficiales en los bosques son indicadores de las condiciones de vulnerabilidad y de riesgos de sufrir incendios en localidades específicas (Castañeda *et al.*, 2015). La información así generada también contribuye a tomar decisiones relacionadas con el manejo del fuego, así como instrumentar acciones preventivas como las quemaduras prescritas, y de evaluación de los efectos de los incendios sobre los ecosistemas (Rodríguez *et al.*, 2011; Villers *et al.*, 2013).

Con base en todo lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el contenido de biomasa arbustiva, herbácea, de la hojarasca y necromasa sobre el suelo en tres tipos de vegetación, como indicadores de riesgo de incendio en los bosques de San Antonio, municipio San Miguel Chimalapa, Oaxaca.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en la localidad de San Antonio, perteneciente a la zona oriente del municipio San Miguel Chimalapa, Juchitán, Oaxaca, entre las coordenadas 16°39'27.56" N y 94°11'34.74" O, a una altitud media de 1 075 m. El clima es AC(w₂)(w) (semicálido subhúmedo), con humedad relativa alta, lluvias de verano con precipitación media anual de 576 a 3 300 mm y temperatura media anual de 20 °C (Rodríguez, 2014).

La vegetación asociada al encinar se caracteriza por incluir ejemplares de *Liquidambar styraciflua* L., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Quercus corrugata* Hook. y *Q. peduncularis*, Née, con diámetro normal (DN) de 20.0 ± 15.0 cm y altura (AT) de 14.6 ± 6.2 m. El estrato arbóreo del bosque mesófilo de montaña posee mayor variabilidad en DN (19.0 ± 13.0 cm) y menor en AT (12.1 ± 3.4 m), debido a la gran diversidad de especies que reúne, entre las que destacan: *L. styraciflua*, *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex DC., *Cinnamomum effusum* (Meisn.) Kosterm., *Capparis* sp., *Ficus pertusa* L. f., *Podocarpus* sp., *Pinus pseudostrobus*, *Q. corrugata*, *Rheedia macrophylla* (Mart.) Planch. & Triana, *Sweetia panamensis* Benth. y *Ternstroemia pringlei* (Rose) Standl. Por último, el bosque de pino, se identifica por la presencia de *L. styraciflua*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *Q. corrugata* y *Q. crassifolia* Humb. et Bonpl., registra las dimensiones más altas de DN (24.1 ± 18.5 cm) y de AT (14.80 ± 6.5 m).

On the other hand, the amount and quality of the surface fuels in the forests are indicative of the conditions of vulnerability and the risks of fires in specific localities (Castañeda *et al.*, 2015). The information thus generated will also contribute to make decisions regarding the management of the fire, as well as to implement preventive actions such as prescribed burnings, and for the assessment of the effects of fires on the ecosystems in the region (Rodríguez *et al.*, 2011; Villers *et al.*, 2013).

Based on all the former, the objective of this study was to evaluate the content of the biomass of bushes, weeds and dead leaves and the necromass on the forest floor for three vegetation types as indicators of fire risk in the forests of San Antonio, Municipality of San Miguel Chimalapa, Oaxaca.

Materials and Methods

Description of the study area

The research was developed in the locality of San Antonio, in the Eastern area of the Municipality of San Miguel Chimalapa, Juchitán, Oaxaca, between the coordinates 16°39'27.56" N and 94°11'34.74" W, at a mean altitude of 1 075 m. The climate is AC(w₂)(w) semiwarm subhumid, with a relatively high humidity, summer rains with a mean annual precipitation of 576 to 3 300 mm, and a mean annual temperature of 20 °C (Rodríguez, 2014).

The vegetation associated with the oak forest is characterized by including specimens of *Liquidambar styraciflua* L., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Quercus corrugata* Hook. and *Q. peduncularis*, Née with a normal diameter (ND) of 20.0 ± 15.0 cm and a total height (TH) of 14.6 ± 6.2 m. The arboreal stratum of the montane cloud forest has a higher variability in ND (19.0 ± 13.0 cm) and a lower variability in TH (12.1 ± 3.4 m), due to the great diversity of the species it includes, among which the most prominent are: *L. styraciflua*, *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex DC., *Cinnamomum effusum* (Meisn.) Kosterm., *Capparis* sp., *Ficus pertusa* L. f., *Podocarpus* sp., *Pinus pseudostrobus*, *Q. corrugata*, *Rheedia macrophylla* (Mart.) Planch. & Triana, *Sweetia panamensis* Benth. and *Ternstroemia pringlei* (Rose) Standl. Finally, the pine forest, characterized by the presence of *L. styraciflua*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *Q. corrugata* and *Q. crassifolia* Humb. et Bonpl., has the highest dimensions for ND (24.1 ± 18.5 cm) and TH (14.80 ± 6.5 m).



Elección de sitios y muestreo de biomasa

En 2014 se realizaron recorridos en la zona con mayor frecuencia de incendios que tiene una extensión de 1 200 ha, en donde se ubicaron 15 sitios de muestreo de manera dirigida, con base en la variación de los factores topográficos, la distribución y tipo de vegetación; se buscaron contrastes en la densidad arbórea (denso, semidenso y fragmentado), áreas en las que existen 387, 347 y 261 árboles ha⁻¹, respectivamente, de acuerdo a la clasificación de Castañeda *et al.* (2015).

Las unidades de muestreo de 0.1 ha se distribuyeron equitativamente en tres tipos de bosque: mesófilo de montaña, de pino y de encino, a partir de la pendiente, la exposición, la altitud y la posición topográfica (Figura 1).

Site selection and biomass sampling

In 2014, several visits were made to the area with the highest frequency of fires, with a surface area of 1 200 ha, where 15 sampling sites were established under supervision based on the variation of the topographic factors and the distribution and vegetation type; contrasts in the tree density (dense, semi-dense and fragmented) were sought in areas with 387, 347 and 261 trees ha⁻¹, respectively, according to the classification by Castañeda *et al.* (2015).

The sampling units of 0.1 ha were evenly distributed in three types of forests: montane cloud, pine and oak forests, based on the slope, exposure, altitude and topographic position (Figure 1).

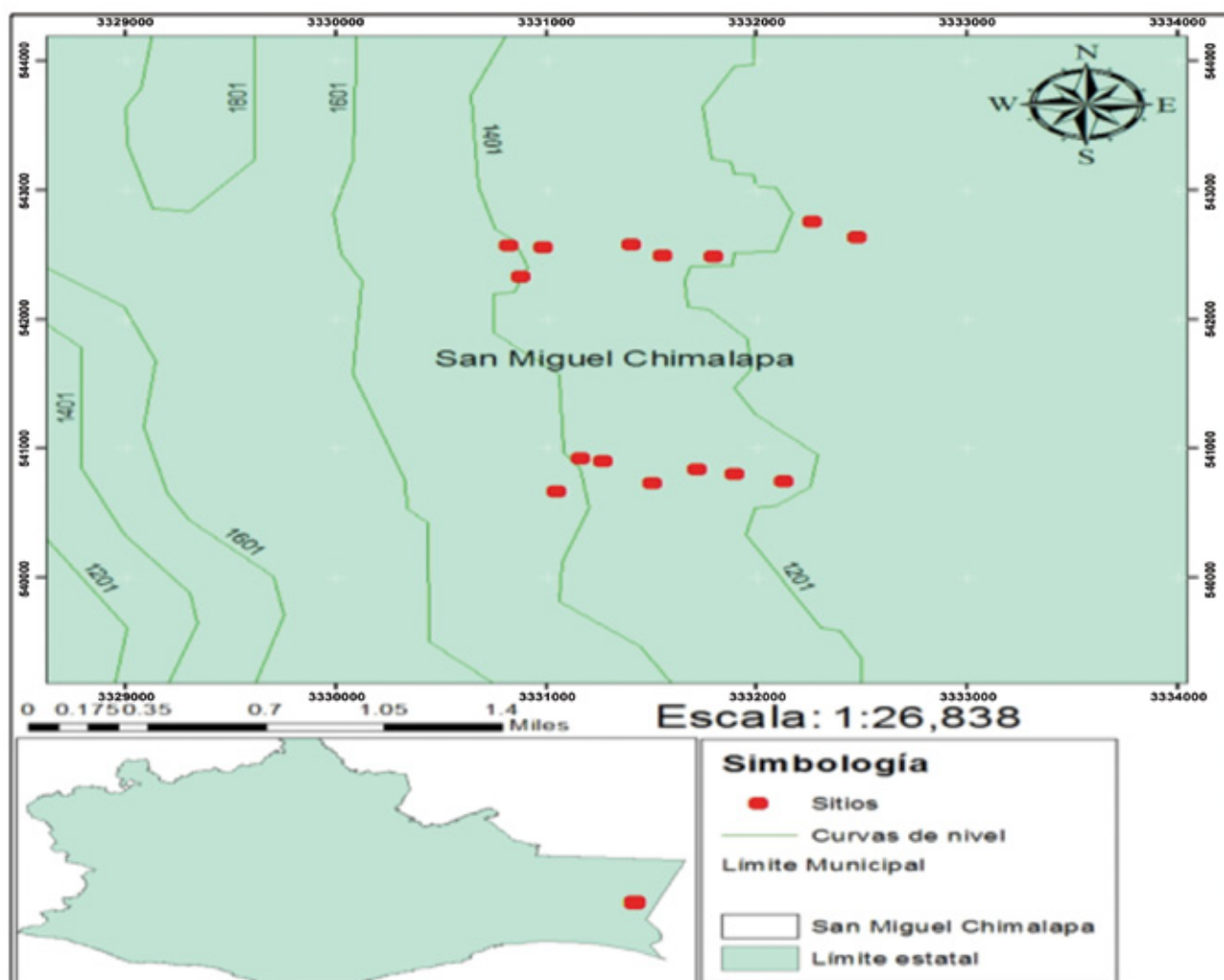


Figura 1. Delimitación del área de estudio y ubicación de los sitios de muestreo.

Figure 1. Delimitation of the study area and location of the sampling sites.

Con el propósito de estimar la biomasa en el piso forestal se establecieron subsitios de 9 y 1 m² dentro de los sitios de 0.1 ha. En cada parcela de 0.1 ha se registró el número de sitio, la exposición, la pendiente (%), coordenadas geográficas y altitud (los dos últimos datos se obtuvieron con GPS marca *Garmin*, modelo *eTrex 20*). Se realizó el inventario de los árboles registrando los siguientes datos: especie, diámetro normal (cm) medido con forcípula y altura total (m) con clinómetro marca *Suunto PM5* modelo *66PC*. El diámetro de los arbustos (<2.5 cm) se consideró a la altura del suelo, con un vernier marca *Foy*, modelo *128 in*. También se corroboraron los datos topográficos de los sitios.

En el bosque mesófilo y en el de encino se escogió un árbol de cada especie presente en los 15 sitios de manera aleatoria para el análisis destructivo de biomasa, a partir de la categoría diamétrica media (20 cm); en el caso del pinar se derribaron árboles procedentes de la categoría diamétrica de 25 cm. A 1.30 m de altura se obtuvo una rodaja de aproximadamente 5 cm de espesor y una muestra de viruta con el taladro de *Pressler*; ambas se pesaron en campo para efectos del peso fresco (g) con una báscula marca *Ohaus*, modelo *CS500* con capacidad de 5 kg. Las muestras se identificaron y se llevaron al laboratorio del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO) para calcular su volumen fresco o verde (VV, cm³) por el método de desplazamiento en agua; ahí fueron secadas en estufa de convección modelo *Memmert Beschickung/Loading-Modell 100-800* a ± 102 °C, hasta lograr un peso constante y llegar al peso seco (PS, g) de las piezas de interés. El cociente PS/VV dio como resultado la gravedad específica (GE, g cm⁻³) por especie, que se utilizó para transformar a biomasa el volumen de los árboles, que se derivó de las tablas de volumen del inventario forestal del estado de Oaxaca (Conafor-Semarnat, 2013).

En las unidades de muestreo de 9 m² se cortó la parte aérea de los arbustos para cuantificar su peso verde total (g), posteriormente se seleccionó una muestra que se pesó en campo (PV, g). Las herbáceas, hojarasca y necromasa se muestrearon en el sitio de 1 m²; se determinó el peso total de cada componente en campo y el peso verde (g) de las muestras guardadas en bolsas de papel. Se anotaron los datos de las mismas para su identificación y se transportaron al laboratorio para su secado. Las muestras de arbustos, necromasa, hojarasca y herbácea se secaron en una estufa de convección (*Memmert Beschickung/Loading-Modell 100-800*) a ± 70 °C hasta llegar al peso constante, y se pesaron de nuevo para calcular el peso seco (g) de cada componente con la misma báscula utilizada en campo.

Para cuantificar la biomasa en los compartimentos arbusto, hojarasca, herbácea y necromasa fue necesario calcular el factor de conversión (FC) que resulta de la división del peso seco y el peso verde de las muestras. Con el producto del

In order to estimate the biomass on the forest floor, subsites of 9 and 1 m² were established within the 1.0 ha sites. The site number, exposure, slope (%), geographic coordinates and altitude were registered for each parcel of 0.1 ha (the last two data –coordinates and altitude– were obtained using a *Garmin eTrex 20* GPS). The trees were inventoried based on the following data: species, normal diameter (cm) measured using a caliper, and total height (m) measured with a *Suunto PM5/66PC* clinometer. The diameter of the bushes (<2.5 cm) was measured at soil level using a 1/128" *Foy* vernier. The topographic data of the sites were also verified.

In both the montane cloud and oak forests a tree of each of the species found in the 15 sites was chosen at random for destructive biomass analysis, based on the mean diameter (20 cm); in the case of the pine forest, trees with a diameter of 25 cm were felled. A slice with a thickness of approximately 5 cm and a sample of a shaving made with a *Pressler* drill were taken from a height of 1.30 m; both were weighed in field in order to obtain the fresh weight (g) using a *CS5000* *Ohaus* scale with capacity for 5 kg. The samples were identified and taken to the laboratory of *Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca* (Technological Institute of the Valley of *Oaxaca*, ITVO) in order to estimate their fresh or green volume (GV, cm³) by the displacement-in-water method; they were then dried in a *Memmert Beschickung* loading model 100-800 convection oven at a temperature of ± 102 °C, until the pieces of interest attained a constant weight and reached their dry weight (DW, g). The dry-weight/green volume ratio gave as a result the specific gravity (SG, g cm⁻³) per species, which was used to convert the tree volume, estimated based on the volume tables of the Forest Inventory of the State of *Oaxaca*, to biomass (Conafor-Semarnat, 2013).

In the 9 m² sampling units, the aerial part of the bushes was cut in order to quantify their total green weight (g); a sample was subsequently selected and weighed in field (GV, g). The weeds, dead leaves and necromass were sampled in the 1 m² site. The total weight of each component and the green weight (g) of the samples stored in paper bags were estimated in field. The data of these samples were recorded for identification purposes, and they were taken to the laboratory, where they were dried. The samples of bushes, necromass, dead leaves and herbs were dried in the same oven at ± 70 °C until they reached a constant weight, and then they were weighed again to calculate the dry weight (g) of each component using the scale that was utilized in field.

The conversion factor (CF) had to be estimated, in order to quantify the biomass in the compartments of bushes, dead leaves, weeds and necromass, by dividing the dry weight by the green weight of the samples. The biomass of each of these compartments was estimated by multiplying the fresh weight of the vegetal material in the site by the CF.

peso fresco del material vegetal en el sitio y el FC se estimó la biomasa de cada uno de los compartimentos.

Carga de combustible

Las cargas de combustibles calculadas están consolidadas en dos estratos: 1) combustibles vivos (herbáceas y arbustos) y 2) combustibles superficiales muertos (hojarasca y necromasa). Esta variable se calculó en los sitios por compartimento, mediante las ecuaciones propuestas por Morfín *et al.* (2012) (Cuadro 1).

Análisis estadístico

Se integró la base de datos de biomasa de la madera y de los compartimentos (hojarasca, necromasa, arbustos y herbáceas). Los datos de los compartimentos por tipo de vegetación se sometieron a un análisis de varianza y prueba de Duncan ($P < 0.05$) para la comparación de medias. Para la rutina de análisis se usó el paquete de cómputo SAS (SAS, 2005). Debido a la alta variabilidad en la biomasa y las cargas de combustible fue necesario usar la transformación $\text{Log}(x)$ para cumplir la normalidad y homogeneidad de varianzas y detectar las diferencias estadísticas.

Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para determinar cargas de combustibles por compartimento en el piso forestal (Morfín *et al.*, 2012).

Compartimento	Ecuación
Arbusto	$C = \frac{10 \times PS}{N}$
Herbácea	$C = \frac{10 \times PS}{N}$
Hojarasca	$C = \frac{\sum (h/d)}{8}$
Necromasa	$C = \frac{(k)GE \sum DC(d)}{L}$

C = Carga o biomasa ($t \text{ ha}^{-1}$); PS = Peso seco (kg); N = Tamaño de la parcela (m^2); h = Profundidad de hojarasca (mm); d = Densidad aparente ($t \text{ ha}^{-1}$); k = Constante (1.234); GE = Gravedad específica ($kg \text{ m}^{-3}$); DC = Diámetro cuadrático (cm); L = Longitud de transecto (m).

Resultados

Biomasa superficial y aérea

Los tipos de vegetación evaluados mostraron diferencias significativas ($p < 0.009$) en la biomasa del compartimento herbáceo, el cual fue significativamente (Duncan, 0.05)

Fuel load

The estimated fuel loads are consolidated in two strata: 1) living fuels (weeds and bushes) and 2) dead surface fuels (dead leaves and necromass). This variable was estimated in the sites by compartment, using the equations proposed by Morfín *et al.* (2012) (Table 1).

Statistical analysis

The database of the biomass of the wood and of the compartments (dead leaves, necromass, bushes and weeds) was formed. These data of the compartments by vegetation types were subjected to a variance analysis and to Duncan's mean comparison test ($P < 0.05$). The SAS software package (SAS, 2005) was used for the analysis routine. Due to the high variability found in the biomass and in the fuel loads, the $\text{Log}(x)$ had to be used in order to fulfill the variance normality and homogeneity assumptions and to detect the statistical differences.

Table 1. Equations utilized to determine fuel loads by forest floor compartment (Morfín *et al.*, 2012).

Compartment	Equation
Bushes	$L = \frac{10 \times DW}{N}$
Weeds	$L = \frac{10 \times DW}{N}$
Dead leaves	$L = \frac{\sum (h/dl)}{8}$
Necromass	$C = \frac{(k)SG \sum QD(d)}{L}$

L = Load or biomass ($t \text{ ha}^{-1}$); DW = Dry weight (kg); N = Plot size (m^2); dl = Depth of dead leaves (mm); d = Apparent density ($t \text{ ha}^{-1}$); k = Constant (1.234); SG = Specific gravity ($kg \text{ m}^{-3}$); QD = Quadratic diameter (cm); L = Transect length (m).

Results

Surface and aerial biomass

The assessed vegetation types showed significant differences ($p < 0.009$) in the biomass of the weeds, which was considerably higher (Duncan, 0.05) in the pine forest ($2.11 \pm 0.67 t \text{ ha}^{-1}$) than in the montane cloud forest ($0.79 \pm 0.41 t \text{ ha}^{-1}$). The highest wood biomass contents were found in the oak forest ($135.5 t \text{ ha}^{-1}$), and the lowest ($43.31 t \text{ ha}^{-1}$), in the pine forest. Due to the high variability of the wood, it was not possible to detect significant differences using Duncan's mean comparison test (Table 2).

superior en el bosque de pino ($2.11 \pm 0.67 \text{ t ha}^{-1}$), que en el bosque mesófilo de montaña ($0.79 \pm 0.41 \text{ t ha}^{-1}$). Los mayores contenidos de biomasa en madera se concentraron en el bosque de encino (135.5 t ha^{-1}), mientras que lo contrario ocurrió (43.31 t ha^{-1}) en el bosque de pino. En virtud de la alta variabilidad en la madera, no fue posible detectar diferencias significativas mediante la comparación de medias de Duncan (Cuadro 2).

En los tres tipos de vegetación evaluados no se verificaron diferencias estadísticas significativas (Duncan, $p > 0.05$) en la biomasa acumulada en los compartimentos arbusto, hojarasca y necromasa. De ellos, la hojarasca del bosque de encino registró la cifra más alta (7.33 t ha^{-1}) (Cuadro 2).

On the other hand, no significant statistical differences (Duncan, $p > 0.05$) were found between the three vegetation types in the biomass accumulated in the bushes, dead leaves or necromass. Of these, the dead leaves of the oak forest had the highest proportion (7.33 t ha^{-1}) (Table 2).



Cuadro 2. Biomasa por compartimento superficial y aéreo en cada tipo de vegetación.

Biomasa (t ha^{-1})	Significancia	Tipo de vegetación		
		Mesófilo	Encino	Pino
Arbusto	0.29	$2.95 \pm 1.21 \text{ a}$	$4.36 \pm 1.23 \text{ a}$	$3.54 \pm 1.61 \text{ a}$
Hojarasca	0.14	$3.18 \pm 1.17 \text{ a}$	$7.33 \pm 6.20 \text{ a}$	$2.81 \pm 1.06 \text{ a}$
Herbácea	0.009	$0.79 \pm 0.41 \text{ b}$	$1.22 \pm 0.58 \text{ ab}$	$2.11 \pm 0.67 \text{ a}$
Necromasa	0.62	$1.85 \pm 0.88 \text{ a}$	$2.32 \pm 1.56 \text{ a}$	$2.71 \pm 1.56 \text{ a}$
Madera	0.07	$56.5 \pm 31.79 \text{ a}$	$135.5 \pm 101.5 \text{ a}$	$43.31 \pm 12.0 \text{ a}$

Letras distintas en la misma hilera indican diferencias estadísticas (Duncan, 0.05). La media es acompañada de \pm desviación estándar.

Table 2. Biomass by surface and aerial compartment in each vegetation type.

Biomass (t ha^{-1})	Significance	Vegetation type		
		Montane cloud	Oak	Pine
Bushes	0.29	$2.95 \pm 1.21 \text{ a}$	$4.36 \pm 1.23 \text{ a}$	$3.54 \pm 1.61 \text{ a}$
Dead leaves	0.14	$3.18 \pm 1.17 \text{ a}$	$7.33 \pm 6.20 \text{ a}$	$2.81 \pm 1.06 \text{ a}$
Weeds	0.009	$0.79 \pm 0.41 \text{ b}$	$1.22 \pm 0.58 \text{ ab}$	$2.11 \pm 0.67 \text{ a}$
Necromass	0.62	$1.85 \pm 0.88 \text{ a}$	$2.32 \pm 1.56 \text{ a}$	$2.71 \pm 1.56 \text{ a}$
Wood	0.07	$56.5 \pm 31.79 \text{ a}$	$135.5 \pm 101.5 \text{ a}$	$43.31 \pm 12.0 \text{ a}$

Different letters in the same row indicate statistical differences (Duncan, 0.05). The mean is accompanied by \pm standard deviation.

La acumulación total superficial de biomasa, sin contar la madera de árboles, en cada tipo de vegetación presentó diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.08$). En el bosque de encino y en el de pino los valores fueron de 15.248 y 11.192 t ha^{-1} , respectivamente, mientras que en el bosque de mesófilo de montaña el promedio total fue de 8.778 t ha^{-1} (Cuadro 2 y Figura 2).

Carga de combustible forestal por compartimento y total

Los tipos de vegetación evaluados tuvieron diferencias en la carga acumulada de combustible forestal en herbáceas

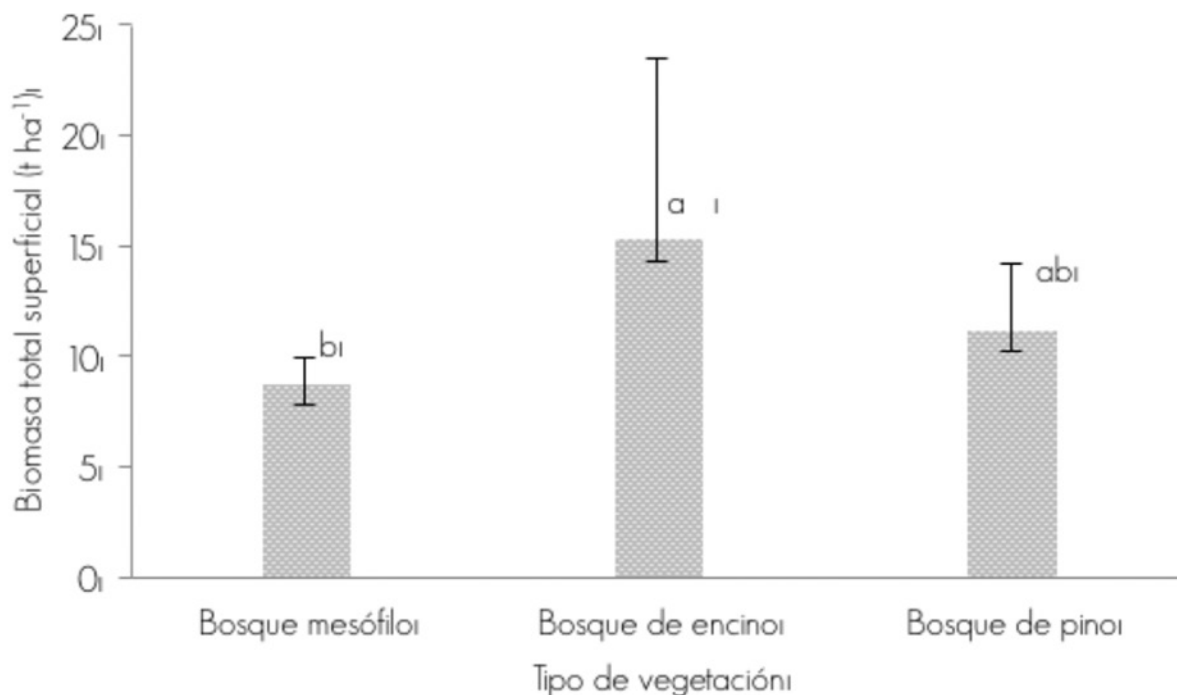
The total surface biomass accumulation, excluding the wood of the trees, presented a statistically significant difference ($p = 0.08$) in each vegetation type. In the oak and pine forests, the figures were 15.248 and 11.192 t ha^{-1} , respectively, while in the montane cloud forest the total mean value was 8.778 t ha^{-1} (Table 2 and Figure 2).

Forest fuel load, total and by compartment

The assessed vegetation types showed differences in the forest fuel load accumulated in the weeds (Duncan, $p = 0.009$), with higher values in the montane cloud forest. This compartment accumulated a larger amount of fuel in this vegetal association

(Duncan, $p = 0.009$), con valores superiores en el bosque mesófilo de montaña. Este compartimento acumuló más cantidad de combustible en dicha asociación vegetal, con respecto a los bosques de encino y de pino; para las herbáceas fue de 0.56 t ha^{-1} y para la necromasa, 0.66 t ha^{-1} . En contraparte, la hojarasca y el arbustivo ($p \geq 0.08$) no confirmaron diferencias significativas, con un promedio de combustible de 1.26 y 0.13 t ha^{-1} , respectivamente; la necromasa tuvo la mayor variabilidad (Cuadro 3).

than oak and pine forests; the value for the weeds was 0.56 t ha^{-1} , and 0.66 t ha^{-1} for the necromass. In contrast, the dead leaves and bushes compartments ($p \geq 0.08$) did not confirm significant differences, with a fuel average of 1.26 and 0.13 t ha^{-1} , respectively; the necromass registered the highest variability (Table 3).



Las líneas verticales sobre las barras representan la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05).
The vertical lines on the bars represent de standard deviation. Different letters indicate significant statistical differences Duncan, 0.05).

Figura 2. Acumulación promedio de biomasa total superficial por tipo de vegetación.
Figure 2. Total average surface biomass accumulation by vegetation type.

Cuadro 3. Cargas de combustible superficial por compartimento y tipo de vegetación.

Biomasa (t ha ⁻¹)	Tipo de vegetación			C.V. (%)	Pr>F
	Bosque mesófilo de montaña	Bosque de encino	Bosque de pino		
Herbácea	0.56 ± 0.10 a	0.43 ± 0.17 ab	0.26 ± 0.06 b	29.4	0.009
Hojarasca	1.25 ± 0.34 a	1.08 ± 0.18 a	1.44 ± 0.37 a	24.9	0.22
Necromasa	0.66 ± 0.19 a	0.36 ± 0.30 ab	0.30 ± 0.22 b	55.8	0.08
Arbusto	0.14 ± 0.04 a	0.14 ± 0.03 a	0.10 ± 0.02 a	24.2	0.10

Letras distintas en la misma hilera indican diferencias estadísticas (Duncan, 0.05). La media es acompañada de \pm desviación estándar. Pr>F= Significancia.

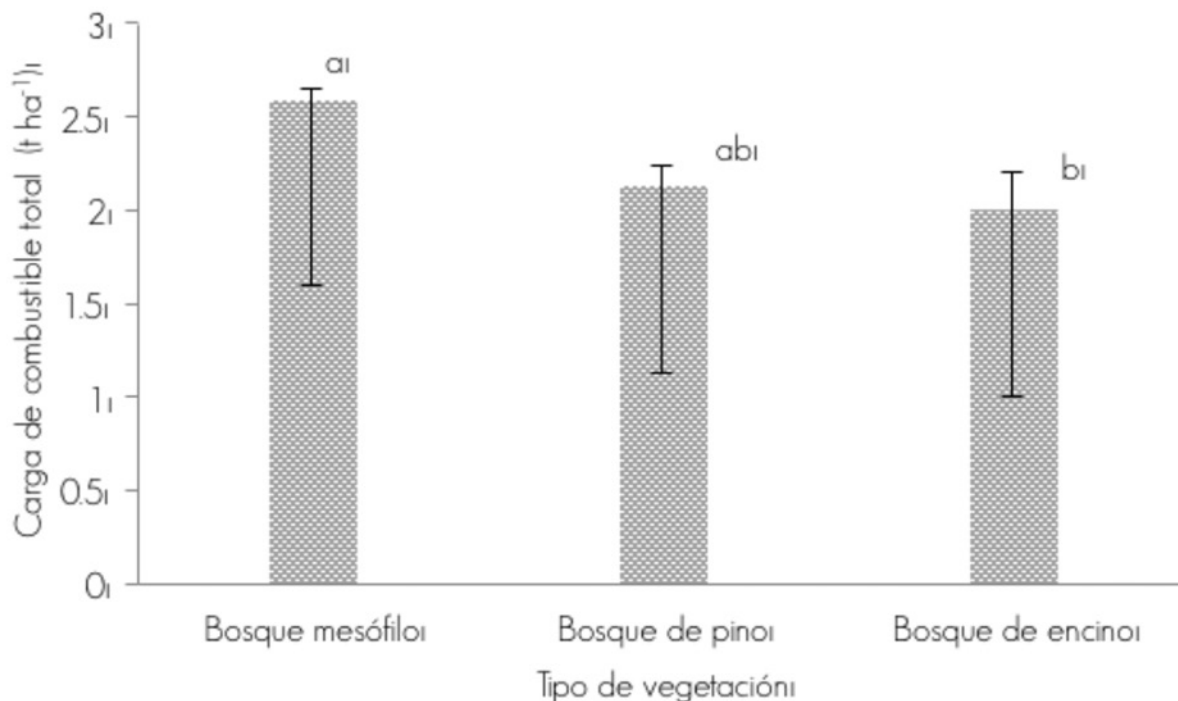
Table 3. Surface fuel loads by compartment and vegetation type.

Biomass (t ha ⁻¹)	Vegetation type			C.V. (%)	Pr>F
	Montane cloud forest	Oak forest	Pine forest		
Weeds	0.56 ± 0.10 a	0.43 ± 0.17 ab	0.26 ± 0.06 b	29.4	0.009
Dead leaves	1.25 ± 0.34 a	1.08 ± 0.18 a	1.44 ± 0.37 a	24.9	0.22
Necromass	0.66 ± 0.19 a	0.36 ± 0.30 ab	0.30 ± 0.22 b	55.8	0.08
Bushes	0.14 ± 0.04 a	0.14 ± 0.03 a	0.10 ± 0.02 a	24.2	0.10

Different letters in the same row indicate statistical differences (Duncan, 0.05). The mean is accompanied by ± standard deviation. Pr>F= Significance.

Al sumar la biomasa presente en los diversos compartimentos (herbácea, hojarasca, necromasa y arbustos) de cada tipo de vegetación, resultó una biomasa total de 2.61 t ha⁻¹, en el bosque mesófilo y de 2.01 t ha⁻¹, para el bosque de encino, cantidades significativamente diferentes (Duncan, 0.05) (Figura 3). Las características topográficas de los sitios y, principalmente, sus pendientes pronunciadas que varían de 28 a 60 %, influyen en la acumulación escasa de combustible que, probablemente, durante las temporadas de lluvias arrastran cuesta abajo la hojarasca y la necromasa, lo que evita que se acumulen cantidades excesivas de combustible en los sitios. La ladera del área de estudio está orientada hacia el noreste, este, norte, noroeste y suroeste, mientras que la altitud varía en un intervalo de 1 323 a 1 504 m.

When the biomass present in the various compartments (weeds, dead leaves, necromass and bushes) was added, the total biomass turned out to be 2.61 t ha⁻¹ in the montane cloud forest, and 2.01 t ha⁻¹ in the oak forest; these values are significantly different (Duncan, 0.05) (Figure 3). The topographic characteristics of the sites and, primarily, their steep slopes, ranging between 28 and 60 %, influence the scarce accumulation of fuel, which, probably during the rainy seasons, cause the dead leaves and the necromass to be dragged downhill, preventing excessive amounts of fuel to accumulate in the sites. The mountainside where the study area is located is oriented mainly toward the northeast, east, north, northwest and southwest, while the latitude ranges from 1 323 to 1 504 masl.



Las líneas verticales sobre las barras representan la desviación estándar.

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05).

The vertical lines on the bars represent the standard deviation.

Different letters indicate significant statistical differences (Duncan, 0.05).

Figura 3. Carga de combustible total por tipo de vegetación.

Figure 3. Total fuel load by vegetation type.

Discusión

En un bosque de pino y de encino de Pueblo Nuevo, Durango, Rentería *et al.* (2005) determinaron que las mayores concentraciones de combustibles se presentan en áreas con baja pendiente (>20 %); este factor varió de 28 a 60 % en el área del presente estudio, aunado a lo cual hay que considerar que en la zona ocurren precipitaciones de 1 900 mm anuales en promedio, para explicar que existen condiciones que promueven el arrastre de la hojarasca y la necromasa a sitios pendiente abajo y se evita con ello, la concentración excesiva de biomasa en el piso forestal de los sitios evaluados.

Aguilar *et al.* (2011) indican, en bosques, una biomasa seca acumulada en hojarasca de 1.70 a 20.10 t ha⁻¹. Los resultados obtenidos para dicho compartimento en la investigación que se documenta muestran una variación de 2.81 a 7.33 t ha⁻¹; el último valor corresponde al bosque de encino. Rodríguez *et al.* (2011) calcularon las cargas de combustibles en selva, con valores de 0.023 a 6.811 t ha⁻¹ en hojarasca; cifras similares a las referidos por Rocha y Ramírez (2009), con una carga de 6.58 ± 0.27 t ha⁻¹ para encinares en Chiapas, y en el caso de la región de los Chimalapas se obtuvieron valores dentro del intervalo citado por dichos autores.

De acuerdo con Arnaldos *et al.* (2004), las existencias de hojarasca dependen de las tasas de producción de cada tipo de comunidad vegetal; mientras que Villers *et al.* (2012) señalan que la acumulación de hojarasca está más relacionada con el porcentaje de árboles adultos en el sitio y menos con la orientación de la ladera o la composición de la vegetación. Por otra parte, Aguilar *et al.* (2011) determinaron la acumulación de necromasa en un intervalo de 0.15 a 22.64 t ha⁻¹. En el presente trabajo, los valores evidenciaron una variación de 1.85 a 2.71 t ha⁻¹, valores que están dentro del límite inferior de los obtenidos por Aguilar *et al.* (2011) para dicho compartimento.

La biomasa total superficial varió de 8.778 a 15.248 t ha⁻¹, este último correspondiente al bosque de encino. Con base en las normas internacionales de cargas de biomasa que menciona Porrero (2001), esos números son bajos y no suponen altos riesgos de incendios forestales. La carga de combustible superficial consignada por Bonilla *et al.* (2013) en un bosque de encino-pino para los compartimentos hojarasca, herbácea y arbusto, fue de 1.73±6.17, 0.36±0.57 y 0.26±0.60 t ha⁻¹, respectivamente; valores similares para los compartimentos evaluados en el presente estudio (Cuadro 2).

Castillo *et al.* (2003) indican que la mayor pérdida de biomasa se debe a los incendios forestales, a lo que habría de agregarse los efectos de su combustión, como la emisión de gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxido nítrico). Según Llovet (2006), el suelo también se impacta severamente por ese fenómeno, en respuesta al incremento

Discussion

In a pine-oak forest in Pueblo Nuevo, Durango, Rentería *et al.* (2005) determined that the highest concentrations of fuels are located in areas with a low slope (>20 %); this factor ranged between 28 and 60 % in the area of the present study; furthermore, the mean annual precipitations in this area, of 1 900 mm, must be taken into account in order to explain the presence of conditions that sweep away the dead leaves and necromass toward sites located downhill, whereby the excessive concentration of biomass on the forest floor of the studied sites is prevented.

Aguilar *et al.* (2011) determined the dry biomass accumulated as dead leaves in forests with a variation range of 1.70 to 20.10 t ha⁻¹. The results obtained for this compartment in the present study show a variation range of 2.81 to 7.33 ha⁻¹; the highest value corresponds to the oak forest. Rodríguez *et al.* (2011) estimated the fuel loads in the rain forest, in which the variation range for dead leaves was of 0.023 to 6.811 t ha⁻¹. These values are similar to those reported by Rocha and Ramírez (2009), with a load of 6.58 ± 0.27 t ha⁻¹ for oak forests in Chiapas; the present study yielded values within the expected interval based on the studies carried out by these authors.

According to Arnaldos *et al.* (2004), the supply of dead leaves depends on the production rate of each type of vegetal community, while Villers *et al.* (2012) mention that the accumulation of dead leaves is related rather to the percentage of adult trees in the site than to the orientation of the mountainside or the makeup of the vegetation. On the other hand, Aguilar *et al.* (2011) determined the accumulation of necromass at an interval of 0.15 a 22.64 t ha⁻¹. In the present study, the obtained values showed a variation range of 1.85 to 2.71 t ha⁻¹; these values are within the lower boundaries of the values obtained by the author for this compartment.

The total surface biomass ranged between 8.778 and 15.248 t ha⁻¹; the latter value corresponds to the oak forest. According to the international norms of biomass loads mentioned by Porrero (2001), these figures are low and do not entail high risks of forest fires. The surface fuel load estimated by Bonilla *et al.* (2013) in a pine-oak forest for the compartments of dead leaves, weeds and shrubs was 1.73±6.17, 0.36±0.57 and 0.26±0.60 t ha⁻¹, respectively. The values mentioned above by the author are similar for the compartments assessed in the present study (Table 2).

On the other hand, Castillo *et al.* (2003) point out that the largest loss of biomass is due to forest fires, and, we should add, to the effects of their combustion, such as the emission of gases (carbon dioxide, carbon monoxide, nitric oxide). According to Llovet (2006), the soil is also severely impacted by the phenomenon due to the increase in temperature and the

de la temperatura y la deposición de cenizas; asimismo, la vegetación y los horizontes orgánicos desaparecen parcial o totalmente, lo que modifica la incidencia de la lluvia sobre la superficie del suelo.

Rodríguez (2014) determinó las cargas de combustibles en San Miguel Chimalapa; sus resultados tienen similitud a los obtenidos en el presente estudio para el compartimento herbácea y arbusto, a excepción de la hojarasca que es superior en el bosque mesófilo y en el bosque de pino (cuadros 3 y 4).

Cuadro 4. Carga de combustible total ($t\ ha^{-1}$) determinada por Rodríguez (2014).

Tipo de vegetación	Hojarasca	Herbácea	Arbusto
Bosque mesófilo de montaña	4.67	0.234	0.693
Bosque de pino	11.24	0.64	0.936
Bosque de pino-encino	2.9	1.28	1.102

Rojas y Villers (2008) establecieron $2.09\ t\ ha^{-1}$ de biomasa total para el bosque de encino, valores que son similares a los calculados en el trabajo que se documenta (Figura 3). Las normas internacionales consideran de $20\ a\ 30\ t\ ha^{-1}$ de alto riesgo, de $15\ a\ 20\ t\ ha^{-1}$ de riesgo medio y menos de $15\ t\ ha^{-1}$ de riesgo bajo (Porrero, 2001). Por ello, el intervalo de $2.008\ a\ 2.59\ t\ ha^{-1}$ determinado en este estudio, el más alto de cuyas cifras se verifica en el bosque mesófilo de montaña, sugiere que el riesgo de incendios es bajo.

En el área de San Antonio Chimalapa, el clima es semicálido, subhúmedo (A)C(w₂)(w), con humedad relativa alta, temperatura media anual de $20\ ^\circ C$ y precipitación media anual varía de $576\text{-}3\ 300\ mm$, lo cual ayuda a que los riesgos de incendios sean bajos, pues según Muñoz *et al.* (2005) las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación) son los factores más importantes que determinan el peligro y presencia de incendios forestales. Sin embargo, Torres *et al.* (2007) establecen que el estado de Oaxaca tiene un alto índice de riesgo de ocurrencia de incendios, lo que podría explicarse por las condiciones del medio físico y por la fuerte incidencia del factor humano.

Conclusiones

La biomasa total de los compartimentos herbáceo, arbustivo, hojarasca y necromasa en el bosque mesófilo de montaña, bosque de encino y bosque de pino son de 8.77 , 15.23 y $11.07\ t\ ha^{-1}$, respectivamente. En el primero se registran los indicadores de riesgo de incendios más altos ($2.61\ t\ ha^{-1}$), con respecto a la

deposición de cenizas; furthermore, the vegetation and the organic horizons disappear partially or totally, modifying the incidence of rain on the soil surface.

Rodríguez (2014) determined the fuel loads in San Miguel Chimalapa; his results are similar to those obtained in the present study for the weeds and bushes compartment, except for the dead leaves, which have a higher load in the montane cloud and pine forests (tables 3 and 4).

Table 4. Total fuel load ($t\ ha^{-1}$) determined by Rodríguez (2014).

Vegetation type	Dead leaves	Weeds	Bushes
Montane cloud forest	4.67	0.234	0.693
Pine forest	11.24	0.64	0.936
Pine-oak forest	2.9	1.28	1.102


Rojas and Villers (2008) estimated $2.09\ t\ ha^{-1}$ of total biomass for the oak forest; this value is similar to the one calculated in the present study (Figure 3). The international norms regard $20\ to\ 30\ t\ ha^{-1}$ as high risk, $15\ a\ 20\ t\ ha^{-1}$ as medium risk, and less than $15\ t\ ha^{-1}$ as low risk (Porrero, 2001). Thus, the interval of $2.008\ a\ 2.59\ t\ ha^{-1}$ determined in this study -the highest found in the montane cloud forest- suggests that the risk of fire is low.

The climate in the study area is semiwarm, subhumid (A)C(w₂)(w), with relatively high humidity; the mean annual temperature is $20\ ^\circ C$, and the mean annual precipitation ranges between $576\ and\ 3\ 300\ mm$, which helps reduce the risk of fire, as, according to Muñoz *et al.* (2005), the weather conditions (temperature, relative humidity and precipitation) are the main factors that determine the hazard and the occurrence of forest fires. However, Torres *et al.* (2007) establish that the state of Oaxaca has a high risk of fires, which may be explained by both the conditions of the physical environment and the strong incidence of the human factor.

Conclusions

The total biomass of the weeds, bushes, dead leaves and necromass compartments among the vegetation types of the montane cloud, oak and pine forests was 8.77 , 15.23 and $11.07\ t\ ha^{-1}$, respectively. The first had the highest risk indicators ($2.61\ t\ ha^{-1}$) in relation to the total fuel load on the forest floor. The risk of forest fires in the study area is low for all three vegetation types.



carga total de combustible sobre el piso forestal. El riesgo de incendios forestales en el área de estudio en los tres tipos de vegetación es bajo. 

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento en especial a las autoridades comunales de San Antonio, Chimalapa, Oaxaca y a la brigada de incendios forestales asignada a dicha comunidad, por las facilidades otorgadas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Jorge Hernández García: muestreo en campo; Gerardo Rodríguez Ortiz: análisis estadístico de datos, revisión del manuscrito y aplicación de correcciones; José Raymundo Enríquez del Valle: análisis de laboratorio; Gisela Virginia Campos Ángeles: análisis de laboratorio; Adán Hernández López: identificación de especies vegetales.

Referencias

- Aguilar A., H., E. Ortiz M., B. Vélchez A. y R. L. Chazdon. 2011. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosque en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Mesoamericana Kurú* 9: 22-31. <http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.360> (2 de marzo de 2015).
- Anta F., S. y A. Plancarte B. 2001. Los incendios forestales en Chimalapas: La última oportunidad. *World Wildlife Fund. Programa México. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Oaxaca, Oax., México.* pp. 121-138.
- Asbjornsen, H. y C. Gallardo. 2004. Impactos de los incendios de 1998 en el bosque mesófilo de montaña de Los Chimalapas, Oaxaca. *In: Villers, L. y J. López (eds). Incendios forestales. Métodos de evaluación.* UNAM, México, D.F., México. pp. 125-145. https://books.google.com.mx/books?id=CiPQd6FSecC&pg=PA141&lpg=PA141&dq=Los+incendios+forestales+en+Chimalapas.+La+%C3%BAltim+a+oportunidad&source=bl&ots=CfkGyJYIDi&sig=79fS2znFOJESSIOI050pKpklVhw&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwJSxOya_bHMAhXB5KYKHdNuAjsQ6AEIGjAA#v=onepage&q=Los%20incendios%20forestales%20en%20Chimalapas%3A%20La%20%C3%BAltima%20oportunidad&f=false (1 de marzo de 2014).
- Arnaldos V., J., X. Navalón N., E. Pastor F., E. Planas C. y L. Zárate L. 2004. *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales.* Mundi Prensa, Madrid, España. 414 p. <http://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484761204/manual-de-ingenieria-basica-para-la-prevencion-y-extincion-de-incendios-forestales> (23 de agosto de 2015).
- Bonilla P., E., D. A. Rodríguez T., A. Borja de la R., C. Cíntora G. y J. Santillán P. 2013. Dinámica de combustibles en rodales de pino-encino de Chignahuapan, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4 (19): 20-33.
- Castañeda R., M. F., A. R. Endara A., M. L. Villers R. y E. G. Nava B. 2015. Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y Bosques* 21(2): 45-58. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140504712015000200003 (10 de febrero de 2016).
- Castillo, M., P. Pedernera y E. Peña. 2003. Incendios forestales y medios ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA* 19(3): 44-53. http://linfor.forestalchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb_.pdf (25 de agosto de 2015).

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude especially to the communal authorities of San Antonio, Chimalapa, Oaxaca, and to the forest fire brigade assigned to this community, for the facilities granted.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Jorge Hernández García: field sampling; Gerardo Rodríguez Ortiz: statistical data analysis, revision and editing of the manuscript; José Raymundo Enríquez del Valle: laboratory analyses; Gisela Virginia Campos Ángeles: laboratory analyses; Adán Hernández López: identification of vegetal species.

End of the English version



- Chávez D., Á. A., J. Xelhuantzi C., E. A. Rubio C., J. Villanueva D., H. E. Flores L. y C. Mora O. 2016. Caracterización de cargas de combustibles para el manejo de reservorios de carbono y la contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 2589-2600. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263144472012> (6 de marzo de 2016).
- Comisión Nacional Forestal-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Conafor-Semarnat) 2013. *Inventario estatal forestal y de suelos-Oaxaca 2013-2014.* Conafor-Semarnat, México, D.F., México. 166 p.
- Contreras A., R. 2009. Estudio de inventario de combustible y generación de información base para el programa de manejo integrado de fuego en Los Chimalapas. *Región Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Oaxaca, Oax., México.* 47 p. http://www.conanp.gob.mx/rendicion_cuentas/pdf/ESTUDIOS%202009/RAFAEL%20CONTRERAS%20AGUADO%20Inventario%20de%20Combustibles%20y%20base%20programa%20MIF%20Chimalapas.pdf (28 de agosto de 2015).
- Grupo Mesófilo A. C. 2006. Diagnóstico para la elaboración de planes comunitarios de prevención de incendios forestales y manejo del fuego en Santa María y San Miguel Chimalapas, Oaxaca. *Oaxaca, Oax., México.* 49 p. <http://www.camafu.org.mx/index.php/prevencion-y-combate-de-incendios-forestales-/articles/diagnostico-para-la-elaboracion-de-planes-comunitarios-de- preven.html> (26 de abril de 2015).
- Estrada C., I. y D. R. Ángeles C. 2007. Evaluación de combustibles forestales en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. *Ecología y biodiversidad, claves de la prevención.* Pachuca, Hgo., México. 17 p. http://www.fire.unifreiburg.de/sevilla2007/contributions/doc/SESIONES_TEMATICAS/ST3/Estrada_Angeles_SPAIN_Zaragoza.pdf (4 de marzo de 2014).
- Llovet L., J. 2006. Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente* 15(3): 199-202. <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/503> (8 de marzo de 2014).
- Morfín R., J. E., E. J. Jardel P., E. Alvarado C. y J. M. Michel F. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. *Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México.* 94 p. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=459> (8 de marzo de 2014).

- Muñoz R., C. A., E. J. Treviño G., J. Verástegui C., J. Jiménez P. y O. A. Aguirre C. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas* 56: 101-117. <http://dx.doi.org/10.14350/ig.30099> (8 de marzo de 2014).
- Porrero R., M. A. 2001. Incendios forestales. Investigación de causas. Tomo I. Mundi Prensa. Madrid, España. 158 p. <http://www.casadellibro.com/libro-incendios-forestales-+investigacion-de-las-causas/9788471149541/763679> (23 de agosto de 2015).
- Rentería A., J. B., E. J. Treviño G., J. de J. Nívar Ch., O. A. Aguirre C. e I. Cantú S. 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1): 51-56. <http://biblat.unam.mx/pt/revista/revista-chapingo-serie-ciencias-forestales-y-del-ambiente/articulo/caracterizacion-de-combustibles-lenosos-en-el-ejido-pueblo-nuevo-durango> (15 de marzo de 2015).
- Rocha L., A. G. y N. Ramírez M. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* (84): 1-12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57712091001> (26 de septiembre de 2015).
- Rojas C., M. C. y A. Ríos V. 2012. Proyecto: Sistemas productivos sostenibles y biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 260 p. http://www.conabio.gob.mx/web/pdf/SPSB_InformeEvaluacionAmbiental.pdf (24 de febrero de 2016).
- Rojas G., F. y L. Villers R. 2008. Estimación de la biomasa forestal del parque nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México* 33(104): 59-85.
- Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, C. Cintora G., R. Contreras A. y A. de la Rosa V. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia* 45: 593-608.
- Rodríguez T., D. A. 2012. Génesis de los incendios forestales. *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(3): 358-373. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01863231201200030008 (4 de marzo de 2014).
- Rodríguez C., E. A. 2014. Programa del manejo integrado del fuego de San Miguel Chimalapa. Comunidad de Aprendizaje y Manejo del Fuego (CAMAFU). Oaxaca, Oax., México. 80 p.
- Rubio C., E. A., M. A. González T., J. D. Benavides S., Á. A. Chávez D. y J. Xelhuantzi C. 2016. Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 2601-2614.
- Statistical Analysis System (SAS). 2005. The SAS for Windows. V. 9.01. SAS Institute. Cary, NC, USA. 480 p.
- Torres R., J. M., O. S. Magaña T. y G. A. Ramírez F. 2007. Índice de peligro de incendios forestales a largo plazo. *Agrociencia* 41(6): 663-674. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30241608> (28 de febrero de 2014).
- Villers G., S., L. Villers R. y J. López B. 2012. Modelos que relacionan las características biofísicas del terreno con la presencia de combustibles forestales en las montañas centrales de México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 59: 369-388. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S14050471201500020003 (8 de marzo de 2014).
- Villers, L., M. Castañeda y A. Endara. 2013. Alerta temprana a incendios forestales en México. In: 4^o Congreso Forestal Argentino Latinoamericano Iguazú. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=3234389&pid=S1405-047120150002000300070&lng=es (14 de marzo de 2014).
- Xelhuantzi C., J., J. G. Flores G. y A. A. Chávez D. 2011. Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(3): 37-52.
- Zinck, D., R., M. Pascual and V. Grimm. 2011. Understanding shifts in wildfire regimes as emergent threshold phenomena. *The American Naturalist* 178(6): 150-161. <http://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/662675> (6 de marzo de 2014).







Artículo / Article

Calidad de planta de *Cedrela odorata* L. asociada con prácticas culturales de vivero

Plant quality of *Cedrela odorata* L. associated with nursery cultural practices

Erickson Basave Villalobos¹, Lucía Concepción García Castillo², Aurelio Castro Ríos², Celi Gloria Calixto Valencia³, José Ángel Sigala Rodríguez¹ y José Luis García Pérez⁴

Resumen

En México muchas reforestaciones con *Cedrela odorata* no han tenido un desempeño inicial favorable, principalmente por el uso de planta de baja calidad, por lo que se requieren de alternativas en los viveros forestales que mejoren dicha condición. En el presente trabajo fue examinada la influencia del volumen de envase e hidrogel sobre la morfología, estado nutrimental y desempeño en campo de plántulas de *C. odorata*. El volumen del envase se manejó a dos niveles: bolsa de polietileno de 500 mL y tubete de plástico de 380 mL; el hidrogel, con tres niveles: adición de 0, 2 y 4 g L⁻¹ de sustrato. Las características de las plántulas se evaluaron en vivero, mediante la determinación de varios indicadores morfológicos de calidad de planta y el uso de nomogramas de análisis de vectores para el diagnóstico del estado del nitrógeno, fósforo y potasio. El desempeño en campo fue medido como supervivencia y crecimiento durante 17 meses, a partir del establecimiento de la plantación. Las plántulas con los mejores atributos fueron las producidas en envases de 500 mL con la adición de hidrogel al sustrato en dosis de 4 g L⁻¹; no obstante, el mejor desempeño en campo correspondió a las producidas en envases de 500 mL sin hidrogel, lo que permite concluir que el volumen de envase tiene un efecto directo en la calidad de planta de *C. odorata*.

Palabras clave: Cedro rojo, *Cedrela odorata* L., producción de planta forestal, reforestación, trópico, vivero forestal.

Abstract

In Mexico, many reforestations with *Cedrela odorata* have not had an initial favorable performance, mainly due to the use of low quality plants, so alternatives are required in forest nurseries to improve such condition. In this work the influence of container volume and hydrogel on the morphology, nutritional status and field performance of the seedlings of this species was examined. The volume of the container was managed at two levels: 500 mL polyethylene bag and 380 mL plastic cartridge; hydrogel, with three levels: addition of 0, 2 and 4 g L⁻¹ of substrate. The characteristics of the seedlings were assessed at the nursery by determining several morphological indicators of plant quality and the use of nomograms of vector analysis for the diagnosis of nitrogen, phosphorus and potassium. Field performance was measured as survival and growth for 17 months, since the establishment of the plantation. The seedlings with the best attributes were produced in containers of 500 mL with the addition of hydrogel to the substrate in doses of 4 g L⁻¹; however, the best performance in the field corresponded to those produced in containers of 500 mL without hydrogel, which allows to conclude that the container volume has a direct effect on the quality of *C. odorata* plant.

Key words: Red cedar, *Cedrela odorata* L., forest plant production, reforestation, tropic, forest nursery.

Fecha de recepción/Reception date: 12 de mayo de 2015; fecha de aceptación/Acceptance date: 31 de junio de 2016.

¹ Campo Experimental Valle del Guadiana. CIR Norte Centro. INIFAP. México. Correo-e: basave.erickson@inifap.gob.mx

² División de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. México.

³ Profesional independiente.

⁴ Sitio Experimental La Campana. CIR Norte Centro. INIFAP. México

Introducción

El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) es una de las especies maderables tropicales más valiosas y de amplia distribución geográfica en América Latina y el Caribe. Su importancia como productora de madera preciosa, engloba aspectos económicos, ecológicos y sociales (Mesén, 2006). Por ello, es muy utilizada en plantaciones destinadas a reforestación en el trópico mexicano.

La mayoría de estas se orientan a proyectos de reconversión productiva en terrenos abandonados con historial de uso agropecuario (Ramírez *et al.*, 2008). Sin embargo, muchas de ellas no han tenido el éxito esperado debido a la alta mortalidad y al pobre crecimiento de las plantas. Dichos problemas se asocian a diversos factores entre los que sobresale la vulnerabilidad de la especie al ataque de *Hypsipyla grandella* (Zeller, 1848) y a la severa degradación del suelo en los sitios de plantación (Calixto *et al.*, 2015). Sin embargo, el impacto de cada uno de ellos ha sido mayor por el uso de planta de baja calidad, que no reúne las características morfológicas y fisiológicas apropiadas a las condiciones de los sitios de destino (Conafor, 2012).

En vivero, la obtención de esas características está relacionada con la implementación de diversas prácticas culturales (Rodríguez, 2008). La elección de una o más depende de su efectividad en el aumento de la calidad de planta en los taxa que se desea producir (Jacobs y Wilkinson, 2009).

En plantas de distintas especies forestales producidas en vivero, tanto de clima tropical como templado-frío, el volumen del envase o la adición de hidrogel al sustrato han demostrado una influencia preponderante sobre la modificación de algunas de sus propiedades. En varias de ellas, a medida que el volumen del envase es mayor, sus aspectos morfológicos de calidad son mejores, tales como la altura, el diámetro del tallo, así como el balance entre la formación de biomasa aérea y la biomasa radical (Ferraz y Engel, 2011; Lisboa *et al.*, 2012; Abreu *et al.*, 2014). En otras, con el uso de hidrogel no solo se ha observado una mejora en la forma (Orikiriza *et al.*, 2009; Maldonado *et al.*, 2011), sino también en aspectos de orden fisiológico, que se refieren al estado nutrimental como uno de los principales atributos afectados (Chirino *et al.*, 2011; Bernardi *et al.*, 2012), lo que se relaciona con la dosis aplicada. Es probable que en *C. odorata* los factores referidos tengan un efecto similar, por lo que es importante estudiarlos detalladamente.

Con base en lo anterior, en este trabajo se analiza la influencia del volumen del envase y de la adición de hidrogel al sustrato sobre la morfología, estado nutrimental y desempeño en campo de plántulas de *C. odorata*. El estudio plantea tres hipótesis: 1) entre mayor es el volumen del envase, los atributos morfológicos de las plántulas de *C. odorata* son mejores; 2) la adición de hidrogel al sustrato también favorece a la morfología y el estado nutrimental de las plántulas; y

Introduction

Red cedar (*Cedrela odorata* L.) is one of the most valuable and widely distributed tropical timber species in Latin America and the Caribbean. Its importance as producer of precious wood, encompasses economic, ecological and social aspects (Mesén, 2006). Therefore, it is widely used in reforestation plantations in the Mexican tropics.

Most reforestations are oriented to projects of productive reconversion in abandoned land with a history of agricultural use (Ramírez *et al.*, 2008). However, many of them have not had the expected success, due to the high mortality and the poor growth of the plants. These problems are associated with a number of factors, such as the vulnerability of the species to the attack of *Hypsipyla grandella* (Zeller, 1848) and severe soil degradation at plantation sites (Calixto *et al.*, 2015). However, the impact of each factor has been greater due to the use of low quality plant, which does not meet the morphological and physiological characteristics appropriate to the conditions of the destination sites (Conafor, 2012).

At the nursery, the accomplishment of these characteristics is related to the implementation of diverse cultural practices (Rodríguez, 2008). The choice of one or more depends on their effectiveness in increasing plant quality of the species to be produced (Jacobs and Wilkinson, 2009).

In plants of different forest species produced in nursery, both tropical and temperate-cold, the volume of the container or the addition of hydrogel to the substrate have shown a predominant influence on the modification of some of its properties. In several of them, as the volume of the container is larger, its morphological aspects of quality are better, such as stem height and diameter, as well as the balance between aerial biomass formation and radical biomass (Ferraz and Engel, 2011, Lisboa *et al.*, 2012, Abreu *et al.*, 2014). In others, with the use of hydrogel not only a shape improvement has been recorded (Orikiriza *et al.*, 2009; Maldonado *et al.*, 2011), but also of physiological order, which refers to the nutritional status as one of the main attributes affected (Chirino *et al.*, 2011; Bernardi *et al.*, 2012), a benefit that depends on the dose applied. It is likely that in *C. odorata* the above factors have a similar effect, so it is important to study them in detail.

Based on the above, this work analyzes the influence of the volume of the container and the addition of hydrogel to the substrate on the morphology, nutritional status and field performance of *C. odorata* seedlings. The study poses three hypotheses: 1) the larger the container volume, the morphological attributes of *C. odorata* seedlings are better; 2) the addition of hydrogel to the substrate also favors the morphology and nutritional status of the seedlings; and 3) nursery seedlings with the most outstanding quality

3) las plántulas de vivero con los atributos de calidad más destacados (morfológicos y estado nutricional) registran tasas elevadas de supervivencia y crecimiento en campo.

Materiales y Métodos

El área de estudio

El estudio comprendió dos etapas experimentales: vivero y campo. Ambas se llevaron a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, ubicado en Villa Lázaro Cárdenas, Venustiano Carranza, Puebla, México, entre las coordenadas geográficas 20°28'28.39" N y 97°41'53.60" O, a una altitud de 344 m. El clima de la zona es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, temperatura media anual entre 22 y 26 °C, con precipitaciones promedio anuales de 1 400 a 1 600 mm (Inegi, 2009).

La etapa de vivero se desarrolló dentro de una casa sombra cubierta por malla negra de 70 %. Durante el ensayo, se registraron temperaturas promedio máximas de 35 °C y mínimas de 20 °C. La humedad relativa promedio diurna osciló alrededor de 85 %. La etapa de campo se realizó en un terreno cuyo historial de uso se relaciona con actividades agropecuarias.

Producción de plántula en vivero

La plántula fue producida a partir de semillas recolectadas en mayo de 2014, procedentes de 10 a 20 árboles, seleccionados por sus características fenotípicas superiores, en rodales naturales localizados en el municipio Coyutla, Veracruz (20°35'80" N y 97°68'30" O). Se pusieron en remojo 1 000 semillas 12 h, en agua corriente para uniformizar su germinación; posteriormente, fueron sembradas sobre un sustrato de arena lavada de río y desinfectado mediante solarización. Tres semanas después, 384 plántulas de altura uniforme (aproximadamente 5 cm) fueron trasplantadas a bolsas negras de polietileno de 500 mL y tubetes de plástico de 380 mL, a los que se les incorporó un sustrato de materia orgánica descompuesta de *Alchornea latifolia* Sw. e hidrogel (tamaño de partícula de 1-2 mm).

Como prácticas culturales complementarias en la producción de la plántula, se fertilizó con el régimen y programa desarrollado para *Swietenia humilis* Zuccarini por Basave et al. (2015), que consiste en aplicar fertilizante hidrosoluble de propósito general (20-20-20) a una dosis base de 17-412 mg L⁻¹ de N. Además, se aplicaron riegos periódicos con base en la disponibilidad de humedad en el sustrato. En total, la producción en vivero duró tres meses.

attributes (morphological and nutritional status) have high rates of survival and growth in the field.

Materials and Methods

Study area

The study comprised two experimental stages: nursery and field. Both were carried out at the *Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza* (Venustiano Carranza Higher Technological Institute), located at *Villa Lázaro Cárdenas, Venustiano Carranza, Puebla, Mexico*, between 20°28'28.39" N and 97°41'53.60" W geographic coordinates, at an altitude of 344 m. The climate of the area is warm humid with abundant rains in summer, average (Inegi, 2009).

The nursery stage was carried out inside a shade house covered by 70 % black mesh. During the assay, average maximum temperatures of 35 °C and minimum temperatures of 20 °C were recorded. The average daytime relative humidity oscillated around 85 %. The field stage was developed in a field, whose history of use is related to agricultural activities.

Production of seedlings in nursery

The seedling was produced from seeds harvested in May 2014 from 10 to 20 trees, selected for their outstanding phenotypic characteristics, in natural stands located in the municipality of *Coyutla, Veracruz State* (20°35'80" N and 97°68'30" W). 1 000 seeds were soaked in running water for 12 h to standardize their germination; later they were planted on a substrate of washed and disinfected sand of river by means of solarization. Three weeks later, 384 seedlings of uniform height (approximately 5 cm) were transplanted into 500 mL polyethylene black bags and 380 mL plastic tube containers, into which which a substrate made up of decomposed organic matter of *Alchornea latifolia* Sw. and hydrogel (1-2 mm particle size) were put.

As complementary cultural practices in the production of the seedling, the plants were fertilized with the regime and program developed for *Swietenia humilis* Zuccarini by Basave et al. (2015), which consists of applying general purpose water-soluble fertilizer (20-20-20) at a base dose of 17-412 mg L⁻¹ of N. In addition, periodic waterings were made in regard to the availability of moisture in the substratum. In total, nursery production lasted three months.



Tratamientos y diseño experimental en vivero

Los factores evaluados en vivero fueron el volumen de envase y la dosis de hidrogel. Para el primero se utilizaron la bolsa negra de polietileno de 500 mL (B500) y el tubete negro de plástico de 380 mL (T380). Para el segundo se consideraron dosis de 0, 2 y 4 g de hidrogel por L de sustrato. Los seis tratamientos resultantes del arreglo factorial 2 x 3, fueron T1 (B500 + 0 g de hidrogel), T2 (B500 + 2 g de hidrogel), T3 (B500 + 4 g de hidrogel), T4 (T380 + 0g de hidrogel), T5 (T380 + 2 g de hidrogel) y T6 (T380 + 4g de hidrogel) con cuatro repeticiones. El tratamiento T4 fue el testigo, ya que representa el principal sistema de producción de *C. odorata* en vivero. La unidad experimental fue de 16 plántulas y se distribuyeron espacialmente sobre una cama de crecimiento, en hileras de 8 x 3, bajo un diseño experimental completamente al azar.

Evaluación de la morfología y estado nutrimental en vivero

Al final de la fase de vivero, a las plántulas se les examinó su morfología y estado nutrimental. La evaluación se hizo en una muestra aleatoria de 16 plántulas por tratamiento (cuatro por repetición). Con base en la metodología descrita por Johnson y Cline (1991), la morfología se analizó a partir de variables morfológicas de calidad de planta: altura del tallo (A[cm]), diámetro de tallo al cuello de la raíz (D[cm]), peso seco aéreo (PSA[g]) y peso seco radical (PSR[g]). Además, se calculó la relación PSA/PSR (R: PSA/PSR), el índice de robustez (IR) y el índice de calidad de Dickson (ICD). El estado nutrimental se midió en función de la concentración y contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Las muestras analizadas morfológicamente fueron enviadas al laboratorio para un análisis químico de tejido vegetal, que se practicó a las plantas completas. La concentración de N (%) se determinó mediante el método *Microkjeldahl*, la de P a través del de vanadato-molibdato amarillo/espectrofotometría y la de K por digestión húmeda/absorción atómica. El contenido (mg de nutrimento/planta) se obtuvo con los valores de biomasa seca total (PSA + PSR) y los de concentración de cada nutrimento (%).

Análisis estadístico de los datos de vivero

Se realizó un análisis de varianza bifactorial con el procedimiento ANOVA de SAS versión 9.2 (2009). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza fueron validados. La prueba de hipótesis se basó en un nivel de significancia de 0.05. Las medias se compararon por pares con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

El estado nutrimental de las plántulas se diagnosticó por el método gráfico de vectores. Este último procedimiento constó de dos etapas: la construcción de nomogramas de vectores

Treatments and experimental design in nursery

The assessed factors in the nursery were the container volume and the hydrogel dose. For the first factor, the 500 mL black polyethylene bag (B500) and the 380 mL black plastic tube (T380) were used. For the second factor, doses of 0, 2 and 4 g of hydrogel per L of substrate were used. The six treatments resulting from the 2 x 3 factorial arrangement were T1 (B500 + 0g hydrogel), T2 (B500 + 2 g hydrogel), T3 (B500 + 4 g hydrogel), T4 (T380 + 0 g hydrogel), T5 (T380 + 2 g of hydrogel) and T6 (T380 + 4g of hydrogel) with four replications. The T4 treatment was the control because it represents the main production system of *C. odorata* at the nursery. The experimental unit was made up by 16 seedlings which were spatially distributed on a bed of growth, in rows of 8 x 3, under a completely random experimental design.

Evaluation of morphology and nutritional status in nursery

At the end of the nursery phase, seedlings were examined for their morphology and nutritional status. The assessment was done in a random sample of 16 seedlings per treatment (four per replication). Based on the methodology described by Johnson and Cline (1991), the first criterion was analyzed from plant quality morphological variables: stem height (A [cm]), stem diameter at the root neck (D [cm]), dry air weight (PSA [g]) and dry weight (PSR [g]). In addition, the PSA/PSR ratio (R: PSA/PSR), the robustness index (RI) and the Dickson quality index (ICD) were calculated. The nutritional status was measured based on the concentration and content of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). The samples previously analyzed morphologically were sent to the laboratory for a chemical analysis of plant tissue, which was practiced to the whole plants. The concentration of N (%) was determined by the microkjeldahl method, the P by vanadate-yellow molybdate/ spectrophotometry and K by wet digestion / atomic absorption. The content (mg of nutrient / plant) was obtained with the values of total dry biomass (PSA + PSR) and the concentration of each nutrient (%).

Statistical analysis of nursery data

A bifactorial variance analysis was performed using the ANOVA procedure of SAS 9.2 version (2009). The assumptions of normality and homogeneity of variance were validated. The hypothesis test was based on a significance level of 0.05. The means were compared in pairs using the Tukey test ($\alpha = 0.05$).

The nutritional status of the seedlings was diagnosed by the vector method. The latter procedure consisted of two stages: the construction of vector nomograms and their interpretation. The nomograms were constructed according to the methodology described by Haase and Rose (1995)

y su interpretación, los cuales se elaboraron conforme a la metodología descrita por Haase y Rose (1995) con valores relativos y de un tratamiento testigo como punto de referencia, que en este caso corresponden a los del T4. Su interpretación se respaldó en los trabajos desarrollados por Haase y Rose (1995) y López y Alvarado (2010).

Establecimiento de la plantación en campo

Debido a la abundancia de malezas en el predio, antes del establecimiento de la plantación se hicieron labores mecánicas de deshierbe, mediante la técnica roza, tumba y quema. Posteriormente, durante la tercera semana de septiembre de 2014, se estableció en campo un lote de 120 plántulas seleccionadas al azar procedente de los tratamientos evaluados en vivero. Al momento de la plantación, la humedad del suelo estaba entre 30 y 40 %. El diseño utilizado fue en tresbolillo con espaciamiento entre árboles de 3 m. La técnica de plantación fue de cepa común. La apertura de las cepas se hizo a 30 cm de profundidad por 20 cm de diámetro. Después del establecimiento de la plantación, bimestralmente las malezas se controlaron de forma manual, y solo en la base del árbol dentro de un perímetro circular de 2 m, aproximadamente.

Tratamientos evaluados y diseño experimental en campo

Los tratamientos evaluados consistieron en los seis analizados en vivero. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. La unidad experimental estuvo integrada por cinco plantas. El diseño experimental utilizado fue el de bloques completos al azar. El criterio de bloqueo fue la variabilidad de humedad en el suelo descrita en el párrafo anterior.

Variables evaluadas en campo

Los criterios para conocer el desempeño de las plántulas en campo fueron la supervivencia y el crecimiento (altura y diámetro). La toma de datos fue mensual durante los primeros seis meses, a partir del momento de plantación (septiembre 2014 a febrero 2015); se hizo una evaluación final a los 17 meses del establecimiento (enero de 2016). La supervivencia se registró como una variable binomial con valores 0 para los individuos muertos y 1 para los vivos. El crecimiento en altura (medida de la base del tallo al ápice principal) y diámetro (medido en la base del tallo), se analizó como tasa de crecimiento absoluto (TCA) con la fórmula siguiente:

$$TCA = \frac{T2 - T1}{\Delta T}$$

Donde:

$T1$ y $T2$ = Crecimiento medido en el momento de la primera y segunda evaluación, respectivamente

with relative values and a control treatment as a reference point, which in this case correspond to those of T4. Their interpretation was based on the works developed by Haase and Rose (1995) and López and Alvarado (2010).

Establishment of field plantation

Due to the great amount of weeds in the field, prior to the establishment of the plantation, mechanical weeding was done through the technique rubble, grave and burning. Subsequently, during the third week of September 2014, a sample of 120 seedlings, selected at random from the treatments evaluated at the nursery, was established in the field. At the time of planting, soil moisture was between 30 and 40 %. The design of the plantation was in triangular spacing with a distance between trees of 3 m. The planting technique was of common strain. The strains were opened at 30 cm depth by 20 cm in diameter. After establishment of the plantation, bimonthly weeds were manually controlled only at the base of the tree within a circular perimeter of about 2 m.

Evaluated treatments and experimental design in the field

The assessed treatments consisted of the six treatments analyzed in nursery. Each one of them had four replicates. The experimental unit consisted of five plants. Randomized complete blocks was the experimental design used. The blocking criterion was the soil moisture variability described in the previous paragraph.

Variables evaluated in the field

The criteria for the performance of seedlings in the field were survival and growth (height and diameter). Data collection was taken each month for the first six months from the time of planting (September 2014 to February 2015); a final evaluation was made at 17 months from the establishment (January 2016). Survival was recorded as a binomial variable with values 0 for dead individuals and 1 for living individuals. Height growth (stem-to-apex measure) and diameter (measured at the base of the stem) were analyzed as absolute growth rate (TCA) using the following formula:

$$TCA = \frac{T2 - T1}{\Delta T}$$

Where:

$T1$ and $T2$ = Growth taken at the time of the first and the second assessment, respectively

ΔT = Interval (time in months) between the two measurements

ΔT = Intervalo (tiempo en meses) entre las dos mediciones

Análisis estadístico de los datos de campo

El análisis de supervivencia se llevó a cabo mediante la prueba Log-Rank a partir de curvas de supervivencia construidas por el método *Kaplan-Meier* que define la función de supervivencia como:

$$S(t) = P(T \geq t)$$

Donde=

- S (t) = Función de supervivencia
- P = Probabilidad de muerte de una plántula
- T = Tiempo indefinido de vida de una plántula mayor al tiempo de duración del estudio
- t = Tiempo definido de vida de una plántula durante el tiempo de duración del estudio

Se siguió el procedimiento LIFETEST de SAS versión 9.2 (SAS, 2009).

Durante el segundo periodo de evaluación se advirtió un gran número de individuos muertos que afectó a tratamientos completos; por lo tanto, únicamente los valores de las tasas de crecimiento absoluto (altura y diámetro) del primer periodo de evaluación fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) con el procedimiento ANOVA en SAS versión 9.2 (SAS, 2009). Previo a ello, los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron validados. La prueba de hipótesis se basó en un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las medias fueron comparadas por pares mediante la prueba *Tukey* ($\alpha = 0.05$).

Resultados

En vivero, la influencia del volumen del envase sobre la modificación de la morfología de las plántulas estuvo asociada con la adición de hidrogel al sustrato (Cuadro 1).

Cuadro 1. Significancia estadística para los indicadores morfológicos de calidad en plántulas de *Cedrela odorata* L. producidas en envases de diferente volumen y con distintas dosis de hidrogel en el sustrato.

Factor de variación	Variables evaluadas						
	A ¹	DCR ²	PSA ³	PSR ⁴	R: PSA/PSR ⁵	IR ⁶	ICD ⁷
Hidrogel	0.10 ^{NS}	0.00 ^{**}	0.27 ^{NS}	0.00 ^{**}	0.00 ^{**}	0.00 ^{**}	0.09 ^{NS}
Volumen de envase	0.08 ^{NS}	<0.00 ^{***}	<0.00 ^{***}	<0.00 ^{***}	0.72 ^{NS}	<0.00 ^{***}	0.04 [*]
Hidrogel*Volumen de envase	0.03 [*]	<0.00 ^{***}	0.01 [*]	0.00 ^{**}	<0.00 ^{***}	0.00 ^{**}	0.04 [*]

* P<0.05; ** P<0.001; *** P<0.0001; NS = No significativo; 1 = Altura de la parte aérea; 2 = Diámetro al cuello de la raíz; 3 = Peso seco aéreo; 4 = Peso seco radical; 5 = Relación peso seco aéreo/radical; 6 = Índice de robustez; 7 = Índice de calidad de Dickson.

Statistical analysis of field data

The analysis of survival was carried out through the Log-Rank test from the survival curves built with the Kaplan-Meier method, which defines the function as:

$$S(t) = P(T \geq t)$$

Where=

- S (t) = Survival function
- P = Death probability of a seedling
- T = Undefined life span of a seedling longer than the time of the study
- t = Defined life span of a seedling during the time of the study

The LIFETEST procedure of SAS 9.2 version (SAS, 2009) was followed.

During the second assessment period there was a high mortality rate that affected complete treatments; therefore, only the values of the absolute growth rates (height and diameter) of the first period were subjected to an analysis of variance by using the ANOVA procedure in SAS 9.2 version (SAS, 2009). Prior to this, the assumptions of normality and homogeneity of variances were validated. The hypothesis test was based on a significance level of $\alpha = 0.05$. The means were compared by pairs using the *Tukey* test ($\alpha = 0.05$).

Results

In nursery, the influence of the container volume on the modification of seedling morphology was associated with the addition of hydrogel to the substrate (Table 1).



Table 1. Statistical significance for quality morphological indicators in *Cedrela odorata* L. seedlings produced in containers of different volumes and with different doses of hydrogel in the substrate.

Variation factor	Assessed variables						
	A ¹	DCR ²	PSA ³	PSR ⁴	R: PSA/PSR ⁵	IR ⁶	ICD ⁷
Hydrogel	0.10 ^{NS}	0.00 ^{**}	0.27 ^{NS}	0.00 ^{**}	0.00 ^{**}	0.00 ^{**}	0.09 ^{NS}
Container volume	0.08 ^{NS}	<0.00 ^{***}	<0.00 ^{***}	<0.00 ^{***}	0.72 ^{NS}	<0.00 ^{***}	0.04 [*]
Hydrogel * Container volume	0.03 [*]	<0.00 ^{***}	0.01 [*]	0.00 ^{**}	<0.00 ^{***}	0.00 ^{**}	0.04 [*]

* P<0.05; ** P<0.001; *** P<0.0001; NS = Non significant; 1 = Height of the aerial part; 2 = Diameter of the root neck; 3 = Aerial dry weight; 4 = Root dry weight; 5 = Aerial/root dry weight ratio; 6 = Robustness index; 7 = Dickson quality index.

Aunque estadísticamente hubo similitud entre los valores de las plántulas del T1 y T3, numéricamente las plántulas del T3 presentaron los mejores valores en la mayoría de las variables morfológicas de calidad (excepto R: PSA/PSR) (Cuadro 2). En relación a las plántulas del tratamiento testigo (T4), las del T3 registraron un crecimiento 19.67 % superior en altura y 24.23 % en diámetro (Cuadro 2). Asimismo, las plántulas del T3 formaron 2.23 veces más biomasa aérea y 1.71 más biomasa radical en comparación con las del testigo (Cuadro 2). El IR, en cuyo caso valores bajos indican mejor calidad, mostró una diferencia de 5 % entre plántulas del T3 y T4 (Cuadro 2). Por último, en el ICD, bajo el supuesto de que valores altos indican mejores resultados, hubo diferencias superiores a 40 % entre los tratamientos mencionados (Cuadro 2).

Although there were statistical similarities between T1 and T3 seedlings, those of T3 showed the best values in most quality morphological variables (except for R: PSA/PSR) (Table 2). In regard to the seedlings of the control treatment (T4), those of T3 showed a growth 19.67 % higher in height and 24.23 % in diameter (Table 2). In addition, the T3 individuals formed 2.23 times more aerial biomass and 1.71 more radical biomass compared to the control treatment (Table 2). IR, in which low values indicate better quality, showed a 5 % difference between T3 and T4 seedlings (Table 2). Finally, in the case of ICD, where higher values are better, there were differences greater than 40 % among the mentioned treatments (Table 2).

Cuadro 2. Valores promedio de las variables morfológicas de calidad evaluadas en plántulas de *Cedrela odorata* L. producidas en envases de diferente volumen y con distintas dosis de hidrogel en el sustrato.

Tratamientos	Variables evaluadas						
	A ¹	DCR ²	PSA ³	PSR ⁴	R:PSA/PSR ⁵	IR ⁶	ICD ⁷
Bolsa negra de polietileno de 500 mL+ sin hidrogel	17.2a [†]	4.8a	1.4a	0.5ab	3.0ab	3.5ab	0.3a
Bolsa negra de polietileno de 500 mL + 2 g de hidrogel	16.2ab	4.1b	1.1ab	0.3bc	3.1ab	3.8ab	0.2b
Bolsa negra de polietileno de 500 mL + 4 g de hidrogel	17.3a	5.2a	1.5a	0.6a	2.5bc	3.3b	0.3a
Tubete de 380 mL + sin hidrogel (testigo)	13.9b	3.9b	0.6c	0.3c	2.0c	3.5ab	0.2b
Tubete de 380 mL + 2 g de hidrogel	16.6ab	4.2b	0.8bc	0.2c	3.4a	3.9ab	0.2b
Tubete de 380 mL + 4 g de hidrogel	17.0a	4.1b	0.8c	0.2c	3.3ab	4.0a	0.2b

† = Altura de la parte aérea (valores promedio en cm ± un error estándar de 0.74); 2 = Diámetro al cuello de la raíz (valores promedio en mm ± un error estándar de 0.14); 3 = Peso seco aéreo (valores promedio en g ± un error estándar de 0.09); 4 = Peso seco radical (valores promedio en g ± un error estándar de 0.04); 5 = Relación peso seco aéreo/radical (valores promedio ± un error estándar de 0.20); 6 = Índice de Robustez (valores promedio ± un error estándar de 0.16); 7 = Índice de calidad de Dickson (valores promedio ± un error estándar de 0.02). Medias con letra distinta dentro de la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey α = 0.05).



Table 2. Average values of the quality morphology variables assessed in *Cedrela odorata* L. seedlings produced in containers of different volume and with different hydrogel doses in the substrate

Treatments	Assessed variables						
	A ¹	DCR ²	PSA ³	PSR ⁴	R:PSA/PSR ⁵	IR ⁶	ICD ⁷
500 mL black polyethylene bag + without hydrogel	17.2a ^a	4.8a	1.4a	0.5ab	3.0ab	3.5ab	0.3a
500 ml polyethylene black bag + 2 g of hydrogel	16.2ab	4.1b	1.1ab	0.3bc	3.1ab	3.8ab	0.2b
500 ml polyethylene black bag + 4 g of hydrogel	17.3a	5.2a	1.5a	0.6a	2.5bc	3.3b	0.3a
380 mL tube containers + without hydrogel (control)	13.9b	3.9b	0.6c	0.3c	2.0c	3.5ab	0.2b
380 mL tube containers + 2 g of hydrogel	16.6ab	4.2b	0.8bc	0.2c	3.4a	3.9ab	0.2b
380 mL tube containers + 4 g of hydrogel	17.0a	4.1b	0.8c	0.2c	3.3ab	4.0a	0.2b

1 = Height of the aerial part (average values in cm ± 0.74 standard error); 2 = Diameter of the root neck (average values in mm ± 0.14 standard error); 3 = Aerial dry weight (average values in g ± 0.09 standard error); 4 = Root dry weight (average values in g ± 0.04 standard error); 5 = Aerial/root dry weight ratio (average values ± 0.20 standard error); 6 = Robustness index (average values ± 0.16 standard error); 7 = Dickson quality index (average values ± 0.02 standard error). Means with different letter within the same column are statistically different (Tukey α = 0.05).

Estado nutrimental

Independientemente del efecto correspondiente a la adición de hidrogel, las plántulas con mayor cantidad de reservas nutrimentales fueron las producidas en los envases de 500 mL (Cuadro 3).

Nutritional condition

Regardless of the corresponding effect of the addition of hydrogel, the seedlings with the greatest amount of nutritional reserves were produced in the 500 mL containers (Table 3).

Cuadro 3. Valores absolutos y relativos del estado nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio de plantas de *Cedrela odorata* L. al final del periodo de producción en vivero.

Tratamiento	Peso seco (mg/planta)	Concentración (%)			Concentración (mg/planta)		
		Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
T1	2.00 (190)*	2.90 (98)	0.35 (89)	2.26 (120)	58.11 (190)	7.01 (173)	45.28 (233)
T2	1.55 (155)	3.07 (104)	0.37 (94)	2.26 (120)	47.60 (155)	5.74 (142)	35.04 (180)
T3	2.13 (208)	2.98 (101)	0.39 (100)	2.37 (126)	63.75 (208)	8.34 (206)	50.70 (261)
T4	1.03 (100)	2.95 (100)	0.39 (100)	1.87 (100)	30.57 (100)	4.04 (100)	19.38 (100)
T5	1.14 (88)	2.36 (80)	0.33 (84)	1.78 (95)	27.10 (88)	3.79 (93)	20.44 (105)
T6	1.06 (74)	2.15 (72)	0.37 (94)	2.23 (119)	22.83 (74)	3.93 (97)	23.68 (122)



Table 3. Absolute and relative values of the nutritional condition of nitrogen, phosphorous and potassium of *Cedrela odorata* L. plants at the end of the production period at the nursery.

Treatment	Dry weight (mg/plant)	Concentration (%)			Concentration (mg/plant)		
		Nitrogen	Phosphorous	Potassium	Nitrogen	Phosphorous	Potassium
T1	2.00	2.90	0.35	2.26	58.11	7.01	45.28
	(190)*	(98)	(89)	(120)	(190)	(173)	(233)
T2	1.55	3.07	0.37	2.26	47.60	5.74	35.04
	(155)	(104)	(94)	(120)	(155)	(142)	(180)
T3	2.13	2.98	0.39	2.37	63.75	8.34	50.70
	(208)	(101)	(100)	(126)	(208)	(206)	(261)
T4	1.03	2.95	0.39	1.87	30.57	4.04	19.38
	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
T5	1.14	2.36	0.33	1.78	27.10	3.79	20.44
	(88)	(80)	(84)	(95)	(88)	(93)	(105)
T6	1.06	2.15	0.37	2.23	22.83	3.93	23.68
	(74)	(72)	(94)	(119)	(74)	(97)	(122)

Asimismo, de acuerdo con los nomogramas de vectores, y al tomar como punto de referencia el estado nutricional de las plantas del T4 en nitrógeno, las del T1 evidenciaron un efecto de dilución, las del T2 de consumo de lujo, las del T3 de suficiencia y las del T5 y T6 de depleción (Figura 1A). Un efecto similar a lo obtenido en nitrógeno se observó para el fósforo, aunque en este caso el T2 ya no mostró un consumo de lujo sino de dilución (Figura 1B). Con respecto al potasio, las plantas del T1, T2, T3 y T6 tuvieron en común efectos de consumo de lujo; no obstante, esta respuesta fue más representativa en los primeros tres tratamientos. En los ejemplares del T5 se registró un efecto de dilución, lo cual fue distinto a lo ocurrido en los demás nutrientes (Figura 1C).

Supervivencia y crecimiento en campo

A 17 meses de establecida la plantación, la supervivencia general promedio fue de 15 %. Durante los primeros 60 días se presentó una mortalidad superior a 25 % (Cuadro 4, Figura 2). La prueba *Log-Rank* mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados ($X^2 = 21.7$, $P = 0.0006$). La mayor supervivencia se obtuvo en plantas del T1 (50 %), aunque sin diferencias significativas de aquellas pertenecientes al T2 y T3. Hubo una mortalidad de 100 % en las plantas del T4; sin embargo, este tratamiento difirió solamente del T1 (Cuadro 5). A pesar de que en T2 y T3 se tuvo supervivencia baja al final del periodo de evaluación, en los primeros seis meses son los tratamientos con la más destacada, cuyos valores fueron superiores a 80 % (Figura 2).

Also, according to the nomograms of vectors, and taking the nutritional status of the plants of T4 in nitrogen, those of T1 showed a dilution effect, those of T2 of luxury consumption, those of T3 of sufficiency and those of T5 and T6 of depletion (Figure 1A). A similar effect to that obtained in nitrogen was observed in phosphorus, although in this case the T2 no longer showed a luxury consumption but of dilution (Figure 1B). In regard to potassium, the plants of T1, T2, T3 and T6 had in common effects of luxury consumption; nevertheless, this response was more representative in the first three treatments. The T5 specimens had a dilution effect, which was different from that of the other nutrients (Figure 1C).

Survival and growth in the field

At 17 months of planting, the average overall survival was 15 %. During the first two months, mortality was higher than 25 % (Table 4, Figure 2). The *Log-Rank* test showed highly significant differences among the treatments evaluated ($X^2 = 21.7$, $P = 0.0006$). The highest survival rate was obtained in T1 plants (50 %), although there were no significant differences between those belonging to T2 and T3. There was a 100 % mortality in the T4 plants, even though this treatment differed only from T1 (Table 4). Although T2 and T3 had low survival at the end of the evaluation period, the treatments with the highest survival rate were over 80 % in the first six months (Figure 2).



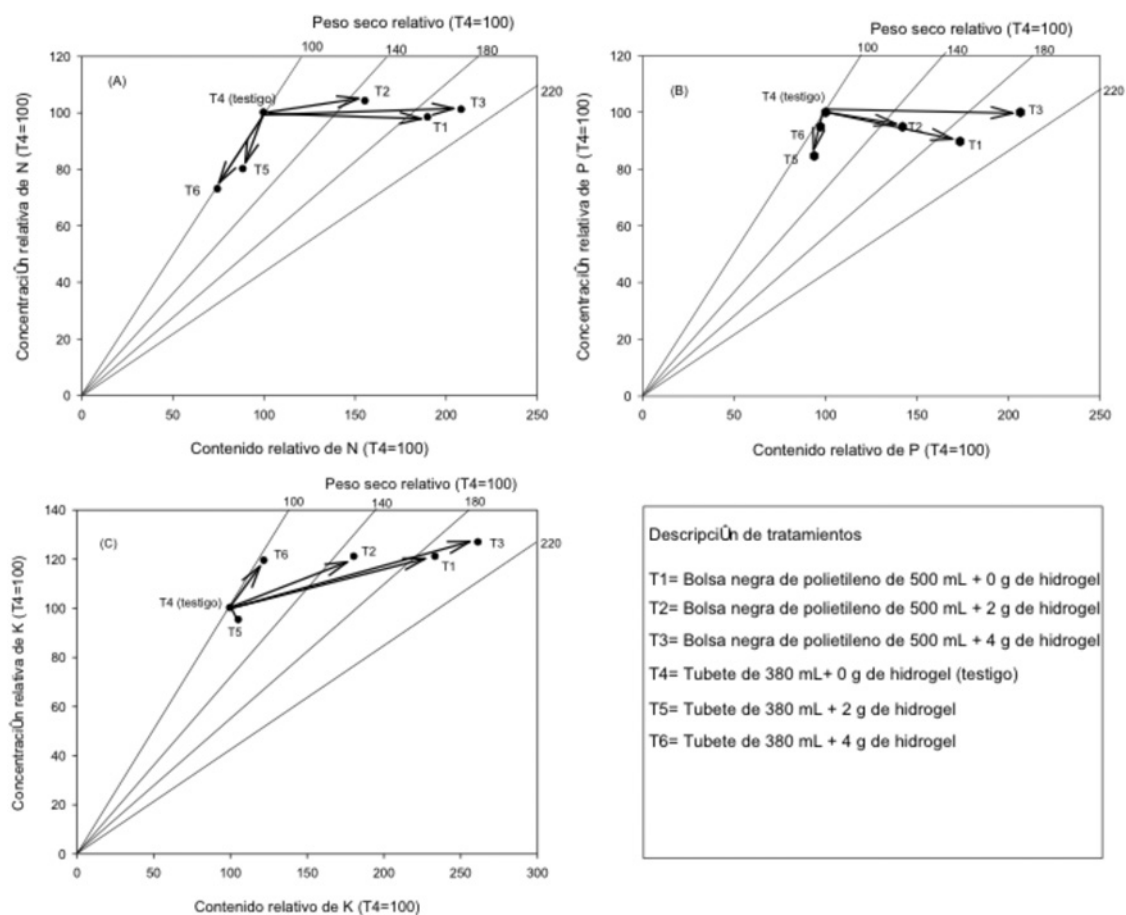


Figura 1. Nomogramas de vectores del estado nutrimental de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de plántulas de *Cedrela odorata* L. al final del periodo de producción en vivero.
 Figure 1. Vector nomograms of the nutritional condition of nitrogen (N), phosphorous (P) and potassium (K) of *Cedrela odorata* L. seedlings at the end of the production period at the nursery

Cuadro 4. Supervivencia estimada en campo, de plántulas de *Cedrela odorata* L. producidas en envases de diferente volumen y distintas dosis de hidrogel en vivero, de acuerdo con el método Kaplan-Meier.

Tratamiento	Meses transcurridos para presentarse una supervivencia menor que:			Supervivencia final (%)*
	75 %	50 %	25 %	
1	16	16	--	50.0a
2	16	16	16	05.0ab
3	16	16	16	15.0ab
4	1	16	16	00.0b
5	1	16	16	10.0b
6	1	2	16	10.0b
General	2	16	16	15.0

T1 = Bolsa negra de polietileno de 500 mL + sin hidrogel; T2 = Bolsa negra de polietileno de 500 mL+2 g de hidrogel; T3 = Bolsa negra de polietileno de 500 mL+4 g de hidrogel; T4 = Tubete de 380 mL+ sin hidrogel; T5 = Tubete de 380 mL+2 g de hidrogel; T6 = Tubete de 380 mL+4 g de hidrogel. *Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas mediante la prueba Log-Rank.

Table 4. Estimated field survival of *Cedrela odorata* L. seedlings produced in containers of different volume and different doses of hydrogel at the nursery, according to the Kaplan-Meier method.

Treatment	Elapsed months to have a survival under:			Final supervival (%)*
	75 %	50 %	25 %	
1	16	16	--	50.0a
2	16	16	16	05.0ab
3	16	16	16	15.0ab
4	1	16	16	00.0b
5	1	16	16	10.0b
6	1	2	16	10.0b
General	2	16	16	15.0

T1 = 500 mL black polyethylene bag + without hydrogel; T2 = 500 mL polyethylene black bag + 2 g of hydrogel; T3 = 500 mL polyethylene black bag + 4 g of hydrogel; T4 = 380 mL tube containers + without hydrogel; T5 = 380 mL tube containers + 2 g of hydrogel; T6 = 380 mL tube containers + 4 g of hydrogel. *Different letters indicate statistical differences through the Log-Rank test.

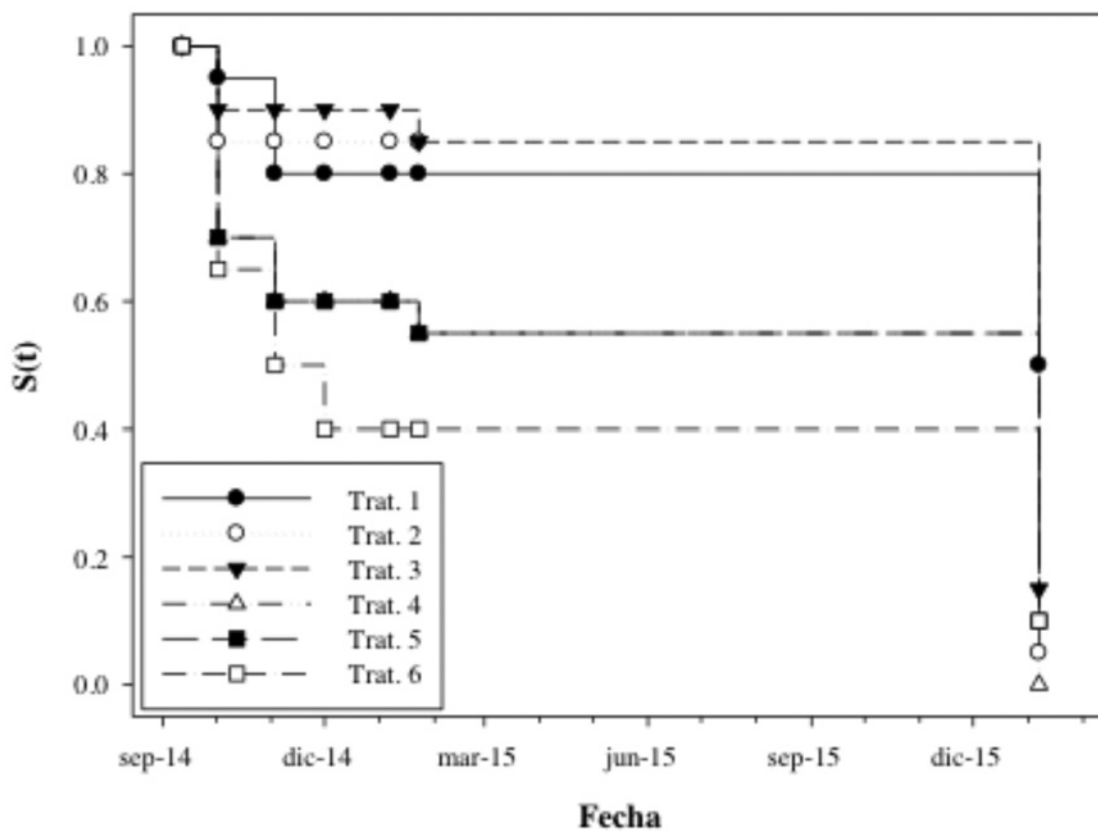


Figura 2. Función de supervivencia estimada $S(t)$ para los diferentes tratamientos de vivero evaluados en la plantación de *Cedrela odorata* L.

Figure 2. Estimated survival function $S(t)$ for the different nursery treatments evaluated at the *Cedrela odorata* L. plantation.

Durante el periodo de crecimiento evaluado en campo, se registraron tanto en altura, como en diámetro diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \geq 0.0001$). En ambos casos, las plántulas del T1 tuvieron las tasas de crecimiento absoluto más elevadas. Al comparar los valores de dicho tratamiento contra los del T4 (testigo), en altura y diámetro las diferencias fueron 200 % y 86 % superiores, respectivamente (Figura 3 A y B).

During the growth period evaluated in the field, there were highly significant differences between treatments ($P \geq 0.0001$) both in height and in diameter. In both cases, T1 seedlings recorded the highest absolute growth rates. When comparing the values of this treatment against those of T4 (control) in height and diameter, differences were 200 % and 86 % higher, respectively (Figure 3A, B).

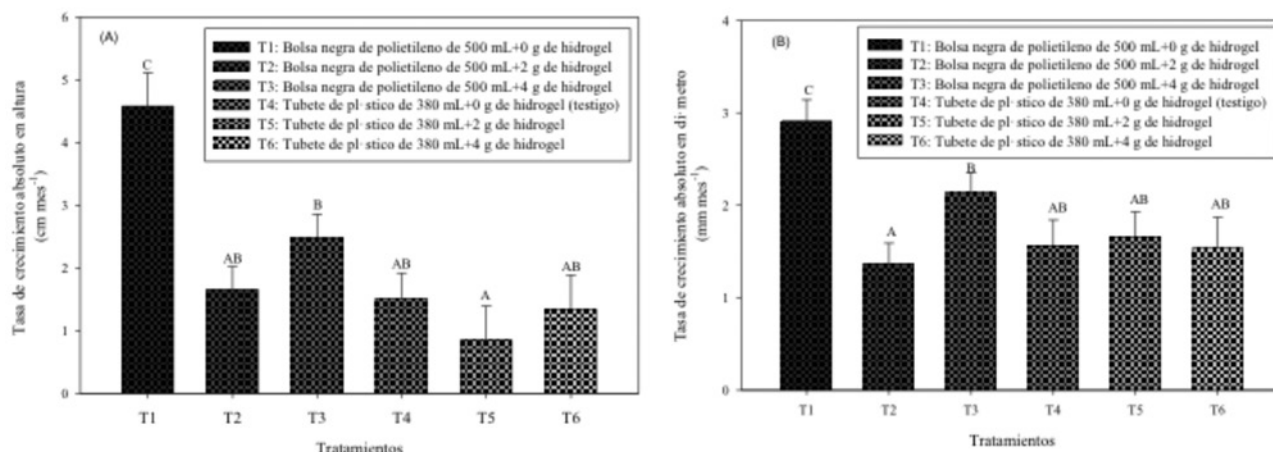


Figura 3. Crecimiento en campo (durante los primeros seis meses de plantación) en altura (A) y diámetro (B) de plántulas de *Cedrela odorata* L. producidas en envases de diferente volumen y distintas dosis de hidrogel en vivero.

Figure 3. Growth in field (during the first six months of planting) in height (A) and diameter (B) of *Cedrela odorata* L. seedlings produced in containers of different volume and doses of hydrogel at the nursery

Discusión

En vivero, la morfología y el estado nutricional de las plántulas de *C. odorata* se mejoran con el uso de envases de 500 mL y la adición de 4 g de hidrogel por litro de sustrato (Cuadro 2). Esta respuesta se atribuye a las condiciones generadas en el medio crecimiento, ya que ambos factores lo constituyen. El medio de crecimiento afecta positivamente el crecimiento de las plantas cuando les provee agua, nutrientes y oxígeno en niveles apropiados.

En ese contexto, la interacción entre el envase de 500 mL (bolsa de polietileno) y la dosis de 4 g de hidrogel (T3), sugiere una respuesta sinérgica positiva que favoreció, en primera instancia, el crecimiento radical. La formación de biomasa radical de las plántulas de dicho tratamiento fue 1.71 veces mayor que la de las plántulas del tratamiento testigo (Cuadro 2). A partir de ello, es probable, así como lo demuestra Orikiriza *et al.* (2009) que cuando hubo un buen crecimiento radical, las plántulas del T3 presentaron una mayor capacidad de absorción de agua, nutrientes y oxígeno, favoreciéndoles tanto un buen crecimiento de sus demás estructuras (Cuadro 2), como un adecuado estado nutricional (Figura 1 A, B, C). Esta hipótesis es sustentada por estudios cuyo contexto es similar al del

Discussion

At the nursery, the morphology and nutritional status of *C. odorata* seedlings are improved with the use of 500 mL containers and the addition of 4 g of hydrogel per liter of substrate (Table 2). This response is attributed to the conditions generated in the growth medium, since both factors make it up. The growth medium positively affects plant growth when it provides water, nutrients and oxygen at appropriate levels.

In that context, the interaction between the 500 mL container (polyethylene bag) and the 4 g dose of hydrogel (T3), suggests a positive synergistic response that favored, in the first instance, the radical growth. The root biomass formation of the seedlings of this treatment was 1.71 times greater than that of the seedlings of the control treatment (Table 2). From this, it is likely, as shown by Orikiriza *et al.*, that as they had a good root growth, the seedling of T3 showed a greater water absorption capacity as well as of nutrients and oxygen, which favors a good development of the rest of their structures (Table 2) and an adequate nutritional status (Figure 1 A, B, C). This hypothesis is supported by studies whose context is similar to that of this paper. For example, Annapurna *et al.* (2004), Ferraz and Engel (2011), Lisboa *et al.*, (2012) and Abreu *et al.* (2014) report

presente trabajo. Por ejemplo, Annapurna *et al.* (2004), Ferraz y Engel (2011), Lisboa *et al.*, (2012) y Abreu *et al.* (2014) registraron un mejor crecimiento y más formación de biomasa aérea y radical en plántulas de diversas especies forestales entre mayor sea el volumen del envase con el que se producen en vivero. Asimismo, la incorporación de hidrogel al sustrato muestra un efecto benéfico sobre el crecimiento y formación de biomasa de plántulas de otros taxa en estudios desarrollados por Orikiriza *et al.* (2009), Maldonado *et al.* (2011), Chirino *et al.* (2011), Bernardi *et al.* (2012) y Navroski *et al.* (2015).

Aunque en el crecimiento de las plantas hay efectos asociados con el tipo de envase (en relación con el tipo de material, forma, color, etcétera) como lo consignan Wightman *et al.* (2001) y Tauer y Cole (2009), las respuestas obtenidas en torno al volumen se atribuyen a que las plantas disponen de más espacio para crecer en biomasa radical, puesto que el envase es una barrera física que restringe el desarrollo de la raíz.

En cambio, los beneficios del hidrogel coinciden con la modificación de las propiedades físicas del sustrato, en especial, al incremento de la capacidad de retención de agua fácilmente disponible, condición que influye de forma positiva en el estado hídrico de las plantas, lo cual ha sido verificado por los ensayos de laboratorio y campo de Koupai *et al.* (2008) y Narjary *et al.* (2012).

En la investigación que aquí se documenta, ni los niveles de la cantidad de agua disponible en el sustrato ni el estado hídrico de las plántulas fueron medidos; no obstante, el supuesto de que las plántulas del T3 hayan registrado las mejores respuestas por el incremento en la capacidad de retención de agua, fácilmente, disponible por efecto de la adición de hidrogel (ya que disponían de más material por el volumen de la bolsa), se relaciona con el estado nutricional representado en los nomogramas de vectores (Figura 1 A, B, C). A diferencia de las plántulas de los otros tratamientos, cuyo estado nutricional fue variable (Cuadro 3, Figura 1 A, B, C), las plántulas del T3 presentaron un consumo de lujo en N, P y K, a pesar del hecho de que la tasa de adición de fertilizante fue igual para todos los tratamientos. De ahí se infiere que la eficiencia de este insumo se mejoró por la disponibilidad de agua, lo cual es coherente con las relaciones, bien conocidas, en las plantas entre agua y absorción de nutrientes (Jones, 2005).

Por otro lado, en campo, el volumen del envase y la adición de hidrogel afectan el desempeño de las plántulas, pero el efecto más directo sobre su calidad está asociado al primer factor. Durante los seis meses iniciales de plantación, los ejemplares de los tratamientos T1, T2 y T3 tuvieron una supervivencia mejor en comparación con los de los T4, T5 y T6; pero a los 17 meses, solo las del T1 mantuvieron ese comportamiento (Cuadro 4, Figura 2); lo anterior contrasta con lo esperado del T3, que al momento de la plantación, eran individuos

a better growth and greater formation of aerial and radical biomass in seedlings of different forest species, as the greater the volume of the container with which they are produced at the nursery. Also, the incorporation of hydrogel to the substrate shows a beneficial effect on the growth and biomass formation of seedlings of other species in works developed by Orikiriza *et al.* (2009), Maldonado *et al.* (2011), Chirino *et al.* (2011), Bernardi *et al.* (2012) and Navroski *et al.* (2015).

Although in plant growth there are effects associated with the type of packaging (in relation to the type of material, shape, color, etc.) as recorded in the works of Wightman *et al.* (2001) and Tauer and Cole (2009), the responses obtained by volume are attributed to the greater space available to plants to grow in radical biomass, since the packaging is a physical barrier that restricts growth

On the other hand, the benefits of the hydrogel coincide with the modification of the physical properties of the substrate, especially to the increase of the capacity of water retention readily available, a condition that influences in a positive way in the water state of the plants, which has been verified by the laboratory and field assays of Koupai *et al.* (2008) and Narjary *et al.* (2012).

In this study, neither the levels of the amount of water available in the substrate nor the water status of the seedlings were measured; however, the assumption that T3 seedlings have shown the best responses due to the increase in the water retention capacity readily available due to the addition of hydrogel (since they had more material by the volume of the bag), is related to the nutritional condition represented in the nomograms of vectors (Figure 1 A, B, C). Unlike the seedlings of the other treatments, whose nutritions varied (Table 3, Figure 1 A, B, C), the T3 seedlings presented a luxury consumption in N, P and K, despite the fact that the rate of fertilizer addition was the same for all treatments. It is inferred that the efficiency of this input was improved by the availability of water, which is consistent with well-known relationships in plants between water and nutrient absorption (Jones, 2005).

Conversely, in the field, the volume of the container and the addition of hydrogel affect the performance of the seedlings, but the most direct effect on its quality is associated with the first factor. During the initial six months of planting, the T1, T2 and T3 treatments recorded a better survival compared to T4, T5 and T6; but at 17 months, only T1 kept this behavior (Table 4, Figure 2) which is contrasting to what was expected of T3, which at the time of planting, were morphologically and nutritionally better individuals. However, in statistical or operational terms with which reforestation success is evaluated (Conafor, 2012), the *C. odorata* survival in the field was not favorable for the whole set of treatments, since there was an overall average mortality of 85 %.

mejores morfológica y nutrimentalmente. Sin embargo, en términos estadísticos u operativos con los que se evalúa el éxito de las reforestaciones (Conafor, 2012), la supervivencia en campo de *C. odorata* no fue favorable para todo el conjunto de tratamientos, pues la mortalidad general promedio fue de 85 %.

Mediante observaciones en campo, se identificó al mal drenaje del suelo (por su textura arcillosa, su capacidad de campo de 34.5 %, el punto de saturación de 64.4 %, la conductividad hidráulica de 0.80 cm h⁻¹ y densidad aparente de 1.18 g cm⁻³) y a la presencia de insectos fitófagos en el lugar, como los principales responsables de la mortalidad elevada. Ambas causas corresponden a los factores a los que *C. odorata* es vulnerable en esquema de plantación forestal (Calixto *et al.*, 2015). Aunque las dos condiciones afectaron a todas las plántulas, sus características determinaron la severidad del impacto de cada uno; al respecto, un efecto diferencial se evidenció entre grupos de tratamientos.

Las plántulas de los tratamientos que involucraron la bolsa de polietileno de 500 mL (T1, T2 y T3) murieron, principalmente, por ataques de saltamontes (*Caelíferos*) e *Hypsipyla grandella*, mientras que las desarrolladas en el tubete de 380 mL (T4, T5 y T6) en su mayoría colapsaron por anegamiento. La susceptibilidad a la herbivoría en las plantas del primer grupo de tratamientos se sustenta en la hipótesis de vigor de plantas de acuerdo con revisiones de Baraza *et al.* (2007). Su aspecto vigoroso y la calidad nutricional de sus tejidos, al parecer, propiciaron un foco de atracción para los insectos, como lo constataron Medinaceli *et al.* (2004) de forma experimental. Por otro lado, la pérdida de los ejemplares del segundo grupo se atribuye a las alteraciones creadas en el suelo por el encharcamiento y a la baja capacidad de las plántulas para tolerar el estrés debido a sus características morfológicas y fisiológicas inferiores (Pardos, 2004) (Cuadro 2).

Al contrario de las reacciones derivadas de la etapa de vivero y similar a la de supervivencia, los sobresalientes crecimientos absolutos en altura y diámetro no correspondieron a las plántulas con las mejores características de calidad (T3), sino a las del T1 (Figura 3). Sumado al efecto positivo del volumen del envase donde se produjeron, cuyas respuestas coinciden con las obtenidas en otros trabajos (Aphalo y Rikala, 2003; Prieto *et al.*, 2007), el crecimiento superior en campo de las plántulas del T1 se vincula con la falta de hidrogeles en su cepellón. Probablemente ante las condiciones de mal drenaje en el suelo del sitio de plantación, las plántulas retuvieron menor cantidad de agua en comparación con las que si disponían de hidrogel, lo que redujo los impactos del anegamiento descritos por Pardos (2004). Al estar menos afectadas por tal condición, la mejor disponibilidad de oxígeno y nutrientes (que no tuvieron las demás plántulas con crecimiento más reducido), les permitió un desempeño más destacado. La limitación ejercida por el hidrogel contrasta con los beneficios reconocidos, por lo general,

Field observations indicate that the soil was poorly drained (due to its clay texture, its field capacity of 34.5 %, saturation point of 64.4 %, water conductivity of 0.80 cm h⁻¹ and apparent density of 1.18 g cm⁻³) and the presence of phytophagous insects on the site, as the main reasons of high mortality. Both causes correspond to the factors to which *C. odorata* is vulnerable in a forest plantation scheme (Calixto *et al.*, 2015). Although the two conditions affected all seedlings, their characteristics determined the severity of the impact of each; in this regard, a differential effect was evidenced between treatment groups.

The seedlings of the treatments involving the 500 mL polyethylene bag (T1, T2 and T3) were killed mainly by attacks of grasshoppers and *Hypsipyla grandella*, whereas those developed in the 380 mL tube (T4, T5 and T6) died mostly by flooding. The susceptibility to herbivory in the plants of the first group of treatments, is based on the hypothesis of plant vigor according to reviews by Baraza *et al.* (2007). Its healthy look and the nutritional quality of its tissues, apparently favored a focus of insects, as Medinaceli *et al.* (2004) experimentally proved it. On the other hand, the loss of seedlings of the second group is attributed to the alterations created in the soil by flooding and the low capacity of the seedlings to tolerate stress due to their lower morphological and physiological characteristics (Pardos, 2004) (Table 2).

Contrary to the reactions derived from the nursery stage and similar to the survival response, the best absolute growths in height and diameter did not correspond to seedlings with the best quality characteristics (T3), but to those of T1 (Figure 3). In addition to the positive effect of the volume of the container where they were produced, whose responses coincide with those obtained in other studies (Aphalo and Rikala, 2003; Prieto *et al.*, 2007), the superior field growth of T1 seedlings is linked to lack of hydrogels in its root ball. Probably due to the poor drainage conditions in the soil of the plantation site, the seedlings retained less water compared to those with hydrogel, which reduced the waterlogging impacts described by Pardos (2004). Being less affected by this condition, the better availability of oxygen and nutrients (which did not have the other seedlings with the lowest growth), allowed them a more outstanding performance. The limitation exerted by the hydrogel contrasts with the generally recognized benefits of this material, which is consistent because the hydrogel effectiveness has been analyzed mostly in drought contexts (Chirino *et al.*, 2011, Orikiran *et al.*, 2013).

These findings have practical implications for reforestation with *C. odorata*. Experimental evidence suggests avoiding the use of hydrogels in poor drainage soils, and instead producing plants in containers whose volume is sufficient to produce a vigorous and competitive plant with high rates of growth that enable them to rapidly evade vulnerability phases on the field;

de este material, lo cual es coherente porque la efectividad del hidrogel ha sido analizada mayoritariamente en contextos de sequía (Chirino et al., 2011; Oriquiriza et al., 2013).

Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas para las reforestaciones con *C. odorata*. La evidencia experimental sugiere evitar el uso de hidrogel en suelos con drenaje pobre, y en su lugar, producir planta en envases cuyo volumen sea suficiente para que la planta resultante sea vigorosa y competitiva, con tasas elevadas de crecimiento que las facultan para evadir rápidamente las fases de vulnerabilidad en campo; no obstante, esta recomendación debe sujetarse a un análisis de costo-beneficio, como el efectuado por Puértolas et al. (2012).

Conclusiones

En vivero se verificó un efecto positivo sobre la calidad morfológica y estado nutricional de las plántulas de *C. odorata* entre mayor es el volumen del envase con el que se producen y con la adición de hidrogel al sustrato, en dosis de 4 g por litro. El volumen del envase y la adición de hidrogel afectaron el desempeño de las plántulas en campo, pero el efecto más directo sobre su calidad se asocia al primer factor. 🌱

Agradecimientos

Los autores expresan su total agradecimiento a Norberto Pérez Silva y Styv de Jesús Calva por el apoyo técnico en la recolección y beneficio del germoplasma. Asimismo, se agradece de manera especial al Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza por el apoyo brindado en sus instalaciones para realizar este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Erickson Basave Villalobos: diseño y planteamiento general del experimento; estructuración y redacción del artículo; Lucía Concepción García Castillo: establecimiento, mantenimiento y conducción del experimento en vivero; Aurelio Castro Ríos: establecimiento, mantenimiento y conducción del experimento en campo; Celi Gloria Calixto Valencia: toma de datos, coordinación y supervisión del experimento en vivero y campo; José Ángel Sigala Rodríguez: procedimiento y análisis estadístico de datos; José Luis García Pérez: análisis estadístico de datos y revisión del manuscrito.

Referencias

Abreu, A. H. M., P. S. S. Leles, L. A. Melo, D. H. A. A. Ferreira and F. A. S. Monteiro. 2014. Produção de mudas e crescimento inicial em campo de *Enterolobium contortisiliquum* produzidas em diferentes recipientes. *Floresta* 45:141-150. DOI: 10.5380/rf.v45i1.28931.

Annapurna, D., T. S. Rathore and G. Joshi. 2004. Effect of container type and size on the growth and quality of seedlings of Indian sandalwood (*Santalum album* L.). *Australian Forestry* 67:82-87. DOI: 10.1080/00049158.2004.10676211.

however, this recommendation should be subject to a cost-benefit analysis, such as that carried out by Puértolas et al. (2012).

Conclusions

There was a positive effect on the morphological quality and nutritional status of *C. odorata* seedlings at the nursery, the greater the volume of the container with which they are produced and the addition of hydrogel to the substrate, in doses of 4 g per liter. The volume of the container and the addition of hydrogel affected the performance of the seedlings in the field, but the most direct effect on their quality is associated with the first factor. 🌱

Acknowledgements

The authors express their total gratitude to Norberto Pérez Silva and Styv de Jesús Calva for the technical support in the collection and benefit of germplasm. Likewise, special thanks to the *Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza* for the support provided in its facilities to carry out this work.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Erickson Basave Villalobos: design and general approach of the experiment; structuring and writing of the article; Lucía Concepción García Castillo: establishment, maintenance and conduction of the nursery experiment; Aurelio Castro Ríos: establishment, maintenance and conduction of the experiment in the field; Celi Gloria Calixto Valencia: data collection, coordination and supervision of the experiment at the nursery and the field; José Ángel Sigala Rodríguez: procedure and statistical analysis of data; José Luis García Pérez: statistical analysis of data and revision of the manuscript.

End of the English version



Aphalo P. and R. Rikala. 2003. Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New Forests* 25:93-108.

Baraza, E., R. Zamora, J. A. Hódar, J. M. Gómez. 2007. Plant-herbivore interaction: beyond a binary vision. *Functional plant ecology*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA, pp. 482-499.

Basave V., E., V. M. Cetina A., M. A. López L., A. Aldrete and D. H. Del Valle Paniagua. 2015. Nursery practices increase seedling performance on nutrient-poor soils in *Swietenia humilis*. *Forest - Biogeosciences and Forestry* 8:552-557. DOI: 10.3832/for1179-007.

- Bernardi, M. R., M. Sperotto J., O. Daniel e A. C. T. Vitorino. 2012. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. CERNE 18:67-74.
- Calixto, C. G., M. A. López L., A. Equihua, D. E. Lira G. y V. M. Cetina A. 2015. Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutricional. Bosque (Valdivia) 36:265-273. DOI: 10.4067/s0717-92002015000200012.
- Chirino, E., A. Vilagrosa and V. R. Vallejo. 2011. Using hydrogel and clay to improve the water status of seedlings for dryland restoration. Plant and Soil 344:99-110. DOI: 10.1007/s11104-011-0730-1.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2012. Evaluación complementaria del PROCOREF ejercicio fiscal 2011. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jal., México. 325 p.
- Ferraz, A. d. V. e V. L. Engel. 2011. Efeito do tamanho de tubetes na qualidade de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang.), IPÊ-Amarelo (*Tabebuia chrysostricha* (Mart. ex DC.) Sandl.) e guarucaia (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan). Revista Árvore 35:413-423.
- Haase, D. L. and R. Rose. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. Forest Science 41:54-66.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México (Inegi). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Venustiano Carranza, Puebla. Clave geoestadística 21194, México D. F., México. s/p
- Jacobs, D. F. and K. M. Wilkinson. 2009. Planning crops and developing propagation protocols. Nursery manual for native plants: a guide for tribal nurseries. Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC, USA. pp. 33-53.
- Jones, J. B. 2005. The plant root: its roles and functions, hydroponics: a practical guide for the soilless grower. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. pp. 19-28.
- Johnson, J. D. and M. L. Cline. 1991. Seedling quality of Southern Pines. Forest Regeneration Manual. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. pp. 143-159.
- Koupai, J. A., S.S. Eslamian and J. A. Kazemi. 2008. Enhancing the available water content in unsaturated soil zone using hydrogel to improve plant growth indices. Ecohydrology & Hydrobiology 8:67-75. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/v10104-009-0005-0>.
- Lisboa, A. C., P. S. d. Santos, S. N. d. Oliveira Neto, D. N.d. Castro e A. H. M. d. Abreu. 2012. Efeito do volume de tubetes na produção de mudas de *Calophyllum brasiliense* e *Toona ciliata*. Revista Árvore 36:603-609.
- López L, M. Á. y J. Alvarado L. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutricional de especies forestales. Madera y Bosques 16:99-108.
- Maldonado B., K. R., A. Aldrete, J. López U., H. Vaquera H. y V. M. Cetina A. 2011. Producción de *Pinus greggii* Engelm. en mezclas de sustrato con hidrogel y riego en vivero. Agrociencia 45:389-398.
- Medinaceli, A., N. P. Flores S., F. Miranda A. y E. Gutiérrez C. 2004. Herbivoría en relación al tamaño de la planta y a las diferencias de exposición de *Pilea* sp. (Urticaceae) en la Estación Biológica Tuniquini, Cotapata, La Paz Bolivia. Ecología en Bolivia 39:4-8.
- Mesén, S. F. 2006. Prácticas de recolección, manejo y uso de germoplasma de especies forestales nativas en América Central y Sur de México. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 62 p.
- Narjary, B., P. Aggarwal, A. Singh, D. Chakraborty and R. Singh. 2012. Water availability in different soils in relation to hydrogel application. Geoderma 187-188:94-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.002>.
- Navroski, M. C., M. M. Araujo, C. S. Fior, F. d. S. Cunha, Á. L. P. Berghetti e M. d. O. Pereira. 2015. Uso de hidrogel possibilita redução da irrigação e melhora o crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden. Scientia Forestalis 43:467-476.
- Orikiriza, L. J. B., H. Agaba, M. Tweheyo, G. Eilu, J. D. Kabasa and A. Hüttermann. 2009. Amending soils with hydrogels increases the biomass of nine tree species under non-water stress conditions. CLEAN-Soil, Air, Water 37:615-620. DOI: 10.1002/clen.200900128.
- Orikiriza, L. J. B., H. Agaba, G. Eilu, J. D. Kabasa, M. Worbes and A. Hüttermann. 2013. Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. Journal of Environmental Protection 04:713-721. DOI: 10.4236/jep.2013.47082.
- Pardos, J. A. 2004. Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales (Fuera de serie):101-107.
- Prieto R, J. Á., P. A. D Calleros, E. H. C. Oviedo y J. J. Nívar Ch. 2007. Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos condiciones de sitio. Madera y Bosques 13:79-97.
- Puértolas, J., D. F. Jacobs, L. F. Benito and J. L. Peñuelas. 2012. Cost-benefit analysis of different container capacities and fertilization regimes in *Pinus* stock-type production for forest restoration in dry Mediterranean areas. Ecological Engineering 44:210-215. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.005>.
- Ramírez G., C., G. Vera C., F. Carrillo A. y O. S. Magaña T. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. Agricultura Técnica en México 34:243-250.
- Rodríguez T., D. A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa, México, D. F., México. 156 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2009. SAS Version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. s/p
- Tauer, P. K. and J. C. Cole. 2009. Effect of fabric and plastic containers on plant growth and root zone temperatures of four tree species. Journal of Environmental Horticulture 27:145-148.
- Wightman, K. E., T. Shear, B. Goldfarb and J. Hagggar. 2001. Nursery and field establishment techniques to improve seedling growth of three Costa Rican hardwoods. New Forests 22:75-96.





Artículo / Article

Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en bosques de coníferas, con escenarios de cambio climático

Potential distribution of *Lophodermium* spp. in conifer forests, with climate change scenarios

Ramiro Pérez Miranda¹, Martín Enrique Romero Sánchez¹,
Antonio González Hernández¹, Eduardo Pérez Sosa² y Víctor Javier Arriola Padilla¹

Resumen

En los bosques de coníferas de los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo, México se han registrado problemas de caída foliar, principalmente, por ataques de *Lophodermium* spp. Las alteraciones en las condiciones climáticas actuales tendrán un papel importante en la distribución futura del hongo. El objetivo del presente trabajo fue determinar la distribución potencial actual y con escenarios de cambio climático (CC) de *Lophodermium* spp. en la vegetación de las entidades antes mencionadas. Se aplicó el algoritmo *Genetic Algorithm for Rule-set Production* (GARP, por sus siglas en inglés) para generar los modelos potenciales de la distribución, a partir de diversas coberturas climáticas (actuales y escenarios de CC), y sitios de presencia del organismo. Los resultados sugieren que las áreas con alto potencial se ubican en la Sierra Norte de Puebla. La superficie de distribución potencial actual con categoría alta es mayor en el periodo de desarrollo (marzo-junio), 83 197 ha, con respecto a la fase de crecimiento (septiembre-diciembre), 74 829 ha. Con el escenario de CC, RCP4.5 (año 2039) la superficie con clase alta se presentó en el periodo de desarrollo, el cual fue de 159 433 ha; en contraste en el escenario RCP8.5 la extensión de la época de crecimiento fue superior, con un valor de 138 810 ha. La etapa de desarrollo del hongo en los escenarios actual y de CC RCP4.5 tuvo superficies con más potencial de presencia del organismo, y en la de crecimiento fue con el escenario RCP8.5.

Palabras clave: Acículas de pino, algoritmo GARP, Bosque de pino, cambio climático, distribución actual, *Lophodermium* spp.

Abstract

In the conifer forests of the states of *Puebla*, *Tlaxcala* and *Hidalgo*, Mexico, leaf fall problems have been registered, mainly due to attack by the *Lophodermium* spp. fungus. Alterations of the current climate conditions will play a significant role in the future distribution of the fungus. The objective of the present work was to determine the current potential distribution, in climate change (CC) scenarios, of *Lophodermium* spp. in the vegetation of the states mentioned above. The Genetic Algorithm for Rule-set Production (GARP) was applied to generate the potential distribution models based on various climate coverages (both current and with CC scenarios), and of sites of occurrence of the fungus. The results suggest that areas with a high potential are located on the *Sierra Norte de Puebla*. The current potential surface area with a high category is larger during the development period (March-June), with 83 197 ha, compared to the growth phase (September-December), with 74 829 ha. With the CC scenario RCP4.5 (for the year 2039), the high class surface area was presented as in a development stage, with 159 433 ha. In contrast, with scenario RCP8.5, the surface area during the growth phase was larger, with 138 810 ha. A higher risk of occurrence of the fungus was observed under the current and CC RCP4.5 scenarios in its development phase, and under scenario RCP8.5 in its growth phase.

Key words: Pine needles, GARP algorithm, pine forest, climate change, current distribution, *Lophodermium* spp.

Fecha de recepción/ Reception date: 18 de mayo de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 13 de agosto de 2016.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, INIFAP, México. Correo-e: perez.ramiro@inifap.gob.mx.

² Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Introducción

Lophodermium pinastri (Schrader) Chev. es conocido como el agente causal de la caída de acículas de pino (Cibrián *et al.*, 2007). Es un hongo que permanece durante todo su ciclo de vida en el árbol, y ataca individuos poco desarrollados y débiles (González, 2004). Las acículas son infectadas a finales de verano u otoño y el patógeno permanece en ellas el invierno de ese año. En la siguiente primavera, el hongo reinicia su crecimiento, en las acículas infectadas que desarrollan manchas pardas con márgenes amarillos, y, al final de la estación, causan la muerte de sus tejidos (Cibrián *et al.*, 2007; French, 1988).

La dispersión se presenta por acción del viento y la lluvia, una vez que se forman los histerotecios, después de que absorben humedad, maduran y descargan sus ascosporas. La infección ocurre, nuevamente, a través del micelio vegetativo en los tejidos de las hojas durante el invierno (Alvarado, 2005; Cordón, 2009). Minter (2015) señala que la distribución de *Lophodermium* es muy abundante en diversos bosques de pino alrededor del mundo y, generalmente, se presenta donde hay contaminación del aire y en altitudes mayores a 1 800 m Hattermer (1964) y Alvarado (2005) indican que los apotecios se desarrollan, principalmente, en las acículas muertas que caen al suelo, donde liberan esporas que infectan a las hojas verdes.

Durante 2015 se detectaron alrededor de 3 000 hectáreas con sintomatología de secamiento de follaje, asociado a *Lophodermium* sp. en los municipios de Zacatlán, Aquixtla y Tetela de Ocampo, estado de Puebla. De no atenderse esta problemática, el hongo podría extenderse a diferentes estados de la república mexicana.

Por otro lado, el cambio climático producirá en las especies forestales estrés hídrico, mayor incidencia de plagas y enfermedades, disminución en la polinización, baja productividad, entre otros impactos (Allen, 2009; Conafor, 2013; IPCC, 2014). Se prevé que el cambio climático originará movimientos a gran escala de especies hacia nuevas zonas de distribución, por lo que serán necesarias definir estrategias de reordenación forestal para compensar los desfases de adaptación de las poblaciones, para mantener la productividad y la salud de los bosques (Yanchuk y Allard, 2009).

El impacto del cambio climático en las plagas y enfermedades forestales afectará su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; además de provocará alteraciones en la fisiología de los organismos; cambios en las relaciones entre plagas, medio ambiente y asociación con otras especies (FAO, 2005; Menéndez, 2007; Moore y Allard, 2008; Samaniego, 2009; Sturrock *et al.*, 2011).

Los modelos climáticos simulan las complejas interacciones entre la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la nieve

Introduction

Lophodermium pinastri (Schrader) Chev. is known as the causative agent of the fall of (Cibrián *et al.*, 2007). This fungus remains on the tree throughout its life cycle and attacks weak, poorly developed individuals (González, 2004). The needles are infected at the end of the summer or in fall, and the pathogen agent remains within them during the following winter. In the subsequent spring, the fungus starts growing once more, on infected needles that develop brownish spots with yellow edges, which cause the death of their tissues at the end of the season (Cibrián *et al.*, 2007; French, 1988).

Dispersion occurs as a result of the action of wind and rain after the histerothecia are formed, absorb moisture, mature and release their ascospores. Infection occurs, again, via the vegetative mycelium in the tissue of the leaves during winter (Alvarado, 2005; Cordón, 2009). Minter (2015) points out that *Lophodermium* is very abundantly distributed in various pine forests across the world and generally occurs where there is air pollution and at altitudes of over 1 800 masl. According to Hattermer (1964) and Alvarado (2005), apothecia develop mainly in dead needles that fall on the ground, where they release spores that infect the green leaves.

Approximately 3 000 hectares with symptoms of leaf drying associated with *Lophodermium* sp. were detected in the municipalities of Zacatlán, Aquixtla and Tetela de Ocampo, in the state of Puebla. If this issue is neglected, the fungus may spread to several states of the Mexican Republic.

On the other hand, climate change will produce hydric stress in forest species, as well as a higher incidence of pests and diseases, reduced pollination and reduced productivity, among other impacts (Allen, 2009; Conafor, 2013; IPCC, 2014). Climate change is expected to bring about large scale movements of species toward new distribution areas; therefore, new forest restructuring strategies will be necessary to compensate the adaptation discrepancies between populations in order to maintain the productivity and good health of forests (Yanchuk and Allard, 2009).

The impact of climate change on forest pests and diseases will affect their development, survival, reproduction, distribution and spreading, as well as the alterations in the physiology of organisms, and changes in the relationships between the pests with other species and with the environment (FAO, 2005; Menéndez, 2007; Moore y Allard, 2008; Samaniego, 2009; Sturrock *et al.*, 2011).

Climate models simulate the complex interactions between the atmosphere, the ocean, the earth's land surface, snow and ice, the global ecosystem and a variety of chemical and biological processes (IPCC, 2013). Scenarios are tools for characterizing

y el hielo, el ecosistema global y una variedad de procesos químicos y biológicos (IPCC, 2013). Los escenarios son herramientas para caracterizar las futuras trayectorias socioeconómicas del cambio climático, sus riesgos, y las implicaciones de las políticas por implementar (IPCC, 2014); son representaciones de lo que acontecerá, debido a cambios en las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) ocasionados por la influencia humana y fuerzas naturales en el sistema climático (IPCC, 2014).

En el marco de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5), el nuevo conjunto de escenarios de simulaciones recientes de modelos climáticos son las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), los cuales actualizan los modelos generales de circulación atmosférica desarrollados anteriormente (IPCC, 2014). Estos nuevos modelos se dividen en cuatro grupos: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, y se refieren a la radiación global de energía expresada en $W\ m^{-2}$ debido al aumento de gases de efecto invernadero (Cavazos *et al.*, 2013).

Derivado de la necesidad de modelar el impacto que el cambio climático tendrá sobre la distribución de plagas y enfermedades forestales y dada la importancia de los hongos fitopatógenos en la Sierra Norte de Puebla, la presente investigación tuvo como objetivo principal determinar la distribución potencial del agente causal de la caída foliar del pino (*Lophodermium* spp.) bajo escenarios de cambio climático en la Sierra Norte de Puebla y regiones circunvecinas. El algoritmo GARP se utilizó para modelar la distribución potencial de *Lophodermium* de acuerdo a las condiciones climáticas actuales y futuras. Los escenarios RCP generados por el IPCC sirvieron como base para el modelado de la distribución potencial futura del hongo.

Materiales y Métodos

Área de estudio y descripción física

El área de estudio comprendió los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, que se ubican entre las coordenadas extremas $96^{\circ}35'00''$ O, $18^{\circ}05'00''$ N, y $99^{\circ}30'00''$ O y $21^{\circ}25'00''$ N (Figura 1).

La vegetación está dominada por bosques de pino (*Pinus* spp.), encino (*Quercus* spp.), pino-encino, encino-pino, oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.), táscate (*Juniperus* spp.), así como especies crasicaules (Cervantes *et al.*, 1990).

En general, son tres grandes grupos de clima los presentes en el área de estudio: templado, semicálido y semiárido (García y Conabio, 1998). La temperatura media anual oscila entre 10 y 16 °C, mientras que la precipitación media anual va de los 500 a $1\ 000$ mm, aunque estos valores cambian en función del tipo de clima (Vidal, 1990; Conabio, 2015).

the future socioeconomic developments of climate change, their risks and the implications of the policies to be implemented (IPCC, 2014). Climate change scenarios are representations of what will happen as a consequence of changes in the Greenhouse Gases (GHG) caused by human influence and by natural forces in the climate system (IPCC, 2014).

Within the framework of the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), the new set of scenarios of recent simulations of climate models are the Representative Concentration Pathways (RCPs), which update the recently developed general atmospheric circulation models (IPCC, 2014). These new models are divided into four groups: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5, and they refer to the global energy radiation, expressed in terms of $W\ m^{-2}$, resulting from the increase in the amount of greenhouse gases (Cavazos *et al.*, 2013).

This research, which stems from the need to model the impact that climate change will have on the distribution of forest pests and diseases, as well as from the importance of the phytopathogenic fungi of the Sierra Norte de Puebla, had as its main objective to determine the potential distribution of the causative agent of the falling of pine needles (*Lophodermium* spp.) under climate change scenarios in the Sierra Norte de Puebla and its neighboring regions. The GARP algorithm was used to model the potential distribution of *Lophodermium* according to the current and future climate conditions. The RCP scenarios generated by the IPCC served as a foundation for modeling the potential future distribution of the fungus.

Materials and Methods

Study area and physical description

The study area comprises the states of Hidalgo, Puebla and Tlaxcala, located between the extreme coordinates $96^{\circ}35'00''$ W, $18^{\circ}05'00''$ N, and $99^{\circ}30'00''$ W and $21^{\circ}25'00''$ N (Figure 1).

The vegetation is dominated by pine (*Pinus* spp.), oak (*Quercus* spp.), pine-oak, oak-pine, sacred fir (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) and Pinchot juniper (*Juniperus* spp.) forests, and by crasicaule species (Cervantes *et al.*, 1990).

In general, three major climate groups are present in the study area: temperate, semiwarm and semiarid (García and Conabio, 1998). The mean annual temperature ranges between 10 and 16 °C, while the mean annual precipitation ranges between 500 and $1\ 000$ mm, although these values change in terms of the type of climate (Vidal, 1990; Conabio, 2015). The soil types are varied, with predominance of Acrisols, Luvisols, Regosols and Lithosols (Conabio, 2015).

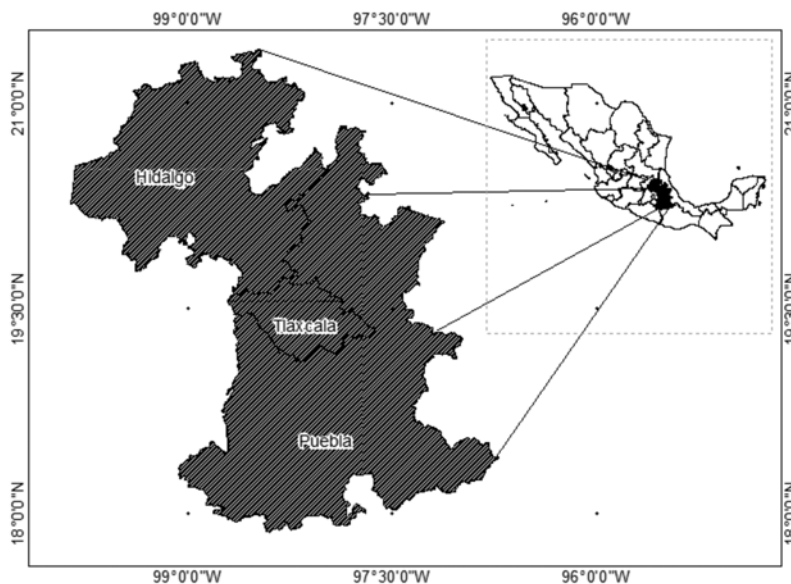


Figura 1. Área de estudio: estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala.
 Figure 1. Study area: states of *Hidalgo*, *Puebla* and *Tlaxcala*.

Los suelos son variados, de manera general predominan los Acrisoles, Luvisoles, Regosoles y Litosoles (Conabio, 2015).

Generación de coberturas ambientales digitales

Las capas ambientales que se utilizaron en el modelo de distribución potencial de *Lophodermium* spp. fueron las climáticas mensuales (precipitación acumulada, temperatura media, humedad relativa promedio y evapotranspiración); topográficas (altitud, exposición y pendientes); vegetación (bosques de pino y mixtos); así como de los sitios de presencia del hongo. Todas las coberturas se referenciaron al sistema de coordenadas geográficas Datum WGS84.

Capas climáticas actuales. Se obtuvieron datos históricos (2011 a 2014) de 12 estaciones meteorológicas: seis del estado de Hidalgo, tres de Puebla, tres de Tlaxcala y 12 de Veracruz, proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua. Las bases de datos se analizaron y procesaron para generar capas mensuales de temperatura media, precipitación acumulada, humedad relativa promedio y evapotranspiración. Esta última se estimó mediante la fórmula de Thornthwaite (1948). Se utilizó el programa *Visual FoxPro 6.0* (Microsoft Corporation, 2000) para calcular promedios del periodo 2011 a 2014 e interpolar los datos por medio del método IDW (*Inverse Distance Weighted*) (ESRI, 2016). La resolución de salida fue de 100 m.

Dado que *Lophodermium* spp. tiene dos fases biológicas importantes: una de crecimiento, conocida como de infestación (finales de verano y otoño); y otra de desarrollo (en primavera)

Generation of digital environmental coverages

The environmental layers used in the potential distribution model of *Lophodermium* spp. were: monthly climate layers (accumulated precipitation, mean temperature, mean relative humidity and evapotranspiration), topographic layers (altitude, exposure and slopes), vegetation (pine and mixed forests) and sites of occurrence of the fungus. All the coverages were referenced to the WGS84 Datum geographical coordinate system.

Current climate layers. Historical data (2011 to 2014) were obtained from 12 weather stations -six for the state of *Hidalgo*, three for *Puebla*, three for *Tlaxcala* and 12 for *Veracruz*- of the National Weather System and the National Water Commission. The databases were analyzed and processed in order to generate monthly layers for mean temperature, accumulated precipitation, mean relative humidity and evapotranspiration. The latter was estimated using Thornthwaite's formula (1948). The *Visual FoxPro 6.0* software (Microsoft Corporation, 2000) was used to calculate the averages for the years 2011-2014 and to interpolate the data using the Inverse Distance Weighted method (ESRI, 2016). The output resolution was 100 m.

Lophodermium spp. have two major biological phases: one of growth, known as infestation (in late summer and fall), and one of development (in spring) (Cibrián *et al.*, 2007). Coverages were generated for both -one in September through December, and the other in March through June.

(Cibrián *et al.*, 2007), se generaron coberturas para ambas; la primera correspondió de septiembre a diciembre y la segunda de marzo a junio.

Capas climáticas bajo escenarios de cambio climático. Las coberturas para escenarios de cambio climático se obtuvieron a partir de proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para México (Cavazos *et al.*, 2013). Se usaron los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para el horizonte 2039, disponibles en el portal electrónico del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (<http://escenarios.inecc.gob.mx>).

Capas temáticas. Las capas temáticas (topografía y vegetación) proceden del sitio electrónico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013). A partir del modelo de elevación digital se generaron las capas de altitud, exposición y pendiente, la resolución de salida fue de 100 m.

Capa de registro de presencia. Los registros de *Lophodermium* spp. se hicieron con base en muestreos en campo; para ello, se ubicaron, geográficamente, los árboles con sintomatología del agente causal de la caída foliar en pinos por medio de un geoposicionador marca Garmin™ GPSMAP 64s. Además, se incluyeron otros de áreas afectadas por *Lophodermium* spp. proporcionados por la Gerencia Estatal de Conafor en Puebla. Todos (127) fueron convertidos a formato vectorial (*.shp) para su integración y procesamiento con el modelo GARP.

Modelado en GARP

Para los modelos de distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático se emplearon soluciones estocásticas generadas por el modelado en GARP. Para la optimización paramétrica de los modelos se estableció el límite de convergencia a 0.001 y 1 000 iteraciones como máximo; en caso de que el valor de límite de convergencia sea cero, el modelo se detendrá hasta alcanzar el valor máximo de iteraciones. Las iteraciones se refieren a las generaciones, en las que los conjuntos de reglas son probadas, reproducidas y mutadas (Martínez, 2010). Del total de puntos de presencias (127), 50 % se usó para el entrenamiento y el resto para realizar la validación de los modelos.

Los modelos de distribución se generaron a partir de las coberturas de temperatura media, precipitación acumulada, humedad relativa promedio, evapotranspiración de los periodos marzo-junio y septiembre a diciembre; además de las coberturas de altitud, pendiente y exposición. El análisis GARP concluyó con un análisis espacial predictivo de la distribución del hongo. Cada predicción deriva de la aplicación de distintos algoritmos. Se siguió lo descrito por Anderson *et al.* (2003), y se tomaron en cuenta los mejores 10 modelos de un total de 100 generados para identificar el patrón de áreas de manera estable.

Climate layers under climate change scenarios. Coverages for climate change scenarios were obtained from short-term (2015-2039) and long-term (2075-2099) projections of 15 global circulation models for Mexico (Cavazos *et al.*, 2013). Scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were utilized for the 2039 horizon and are available at the website of *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático* (the National Institute of Ecology and Climate Change, (<http://escenarios.inecc.gob.mx>)).

Thematic layers. Thematic layers (topography and vegetation) are taken from the website of the *Instituto Nacional de Estadística y Geografía of Mexico* (National Institute of Statistics and Geography) (Inegi, 2013). Based on the digital elevation model, the altitude, exposure and slope layers were generated; the output resolution was 100 m.

Presence record layer. *Lophodermium* spp. records were made based on field samplings; for this purpose, the trees showing symptoms of the causative agent of leaf fall in pines were geographically located using a Garmin™ gpsmap 64s geolocator. Other records of areas affected by *Lophodermium* spp. provided by the state management of Conafor in Puebla were also included. They were all (127) converted to vectorial format (*.shp) for their integration and processing using the GARP model.

GARP modeling

Stochastic solutions generated by GARP modeling were utilized for the potential distribution models, under both current and climate change scenarios. For the parametric optimization of the models, the convergence limit was established at 0.001, with a maximum of 1 000 iterations. If the value for the convergence limit is equal to zero, the model will be stopped until the maximum number of iterations is reached. Iterations refer to the generations in which the sets of rules are tested, reproduced and mutated (Martínez, 2010). Out of the total number of presence points (127), 50 % were used for training, and the rest, for model validation.

Distribution models were generated from the coverages of mean temperature, accumulated precipitation, mean relative humidity, evapotranspiration of the March-June and September-December periods, as well as of altitude, slope and exposure. The GARP analysis concluded with a predictive spatial analysis of the distribution of the fungus. Each prediction is derived from the application of different algorithms. The procedure described by Anderson *et al.* (2003) was followed, and the best 10 out of a total of 100 models generated to identify the area pattern in a stable manner were taken into account.

The 10 best models were integrated into a consensus map with 10 categories, in which the maximum number corresponds to the area with most probability of occurrence of the fungus. The map was classified into potentiality categories: low, in which 1 to 3 models converge; medium, with convergence of

Los 10 mejores modelos se integraron en un mapa de consenso con 10 categorías, en las que el número máximo corresponde al área con mayor probabilidad de presencia del hongo. El mapa se clasificó en categorías de potencialidad: baja donde convergen de 1 a 3 modelos; media, de 4 a 7; alta de 8 a 10, ordenados de mejor a menor grado de ajuste. El último paso fue la modelación espacial de la distribución potencial, en los periodos de marzo a junio y de septiembre a diciembre. Las áreas de posible distribución de *Lophodermium* fueron restringidas a bosques templados con ayuda de la cobertura de vegetación Serie IV de Inegi.

Ajuste y selección de modelos

Se calcularon los errores de comisión y omisión de cada modelo comparando los puntos de prueba con los modelos generados. Los errores de comisión son errores tolerados, ya que pueden implicar que el área predicha es adecuada para la especie, pero está ausente por otro tipo de factores (como error de muestreo, barreras, competencia, etcétera), aunque también queda la posibilidad del verdadero error de comisión por ser el área predicha no adecuada para el taxón. Se eligieron los 10 mejores modelos basados en la distribución óptima del error para cada réplica individual de los mismos y los menores errores de omisión. Los modelos con un valor predeterminado de error de omisión con una tolerancia de 20 % (Stockwell y Peters, 1999; Anderson *et al.*, 2003; Paredes *et al.*, 2011) se usaron para crear el mapa final.

Resultados y Discusión

Caracterización climática actual

Los valores actuales de las variables temperatura, precipitación, evapotranspiración y humedad relativa correspondientes a las etapas de crecimiento y de desarrollo de *Lophodermium* spp. se muestran en el Cuadro 1. En promedio, la temperatura fue superior a 3.5 °C en el periodo de desarrollo, al igual que la evapotranspiración (35.05 mm), con respecto a la de crecimiento; en esta, la precipitación es mayor con 199.45 mm y la humedad relativa con 15.75 %.

Cuadro 1. Caracterización climática actual de las fases de crecimiento y desarrollo de *Lophodermium* spp.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (septiembre-diciembre)	13.6 - 14.2	473.0 - 584.3	213.7 - 219.2	75.8 - 80.2
Desarrollo (marzo-junio)	15.8 - 16.8	343.2 - 445.0	217.8 - 281.1	64.4 - 71.5

4 to 7 models, and high, with convergence of 8 to 10 models, from the highest to the lowest degree of adjustment. The last step was the spatial modeling of the potential distribution in the March-June and September-December periods. The areas of potential distribution of *Lophodermium* were restricted to temperate forests with the help of the vegetal coverage of Inegi Series IV.

Model adjustment and selection

Errors of commission and omission were calculated for each model by comparing the test points with the generated models. Errors of commission are tolerated, as they may imply that the predicted area is adequate for the species but is absent due to some other type of factors (such as sampling error, barriers, competition, etc.), although there is also the possibility of a true error of commission due to inadequacy of the predicted area for the taxon. The 10 best models were selected based on the optimal distribution of the error for each individual replica and the least number of errors of omission. Models with a predetermined omission error value with a 20 % tolerance (Stockwell and Peters, 1999; Anderson *et al.*, 2003; Paredes *et al.*, 2011) were used to create the final map.

Results and Discussion

Current climate characterization

The current values of the temperature, precipitation, evapotranspiration and relative humidity variables for the growth and development stages of *Lophodermium* spp. are shown in Table 1. In average, the temperature was above 3.5 °C in the development period and during evapotranspiration (35.05 mm), in relation to the development phase, during which precipitation and relative humidity were higher, with 199.45 mm and 15.75 %, respectively.



Table 1. Current climate characterization of the growth and development phases of *Lophodermium* spp.

Phases	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (September-December)	13.6 - 14.2	473.0 - 584.3	213.7 - 219.2	75.8 - 80.2
Development (March-June)	15.8 - 16.8	343.2 - 445.0	217.8 - 281.1	64.4 - 71.5

De acuerdo con González (2004), quien realizó un estudio de incidencia y severidad del *Lophodermium* sp en *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *Pinus maximinoi* H.E. Moore en Guatemala, agosto 2003 a enero 2004, registró que un valor alto de humedad relativa (87 a 89 %) favoreció el desarrollo del patógeno. Además, sugirió que temperaturas bajas (<14 °C) y humedad relativa alta son factores determinantes para la maduración y liberación de esporas, lo cual aumenta el riesgo de infección en los árboles de pinos. Por su parte, Prihatini *et al.* (2015), en Tasmania, identificaron una comunidad de hongos asociados a *Lophodermium* en las acículas de *Pinus radiata* D. Don con precipitaciones entre 714 a 1 439 mm anuales, y temperaturas de 5.3 a 8.6 °C. Las precipitaciones abundantes (>400 y <1 000 mm) y humedades relativas altas propician el crecimiento del hongo (González, 2004; Prihatini *et al.*, 2015), lo anterior concuerda con las características de los sitios con presencia del patógeno registrados en el presente estudio.

Distribución potencial actual del hongo *Lophodermium* spp.

De acuerdo a los resultados, los requerimientos climáticos de *Lophodermium* spp. existen en la Sierra Norte de Puebla, por lo que el patógeno tiene un gran potencial de presentarse y extenderse a nuevos rodales de coníferas, tanto en Puebla como en Tlaxcala e Hidalgo. En la Figura 2 se observa que la distribución potencial alta se localiza, fundamentalmente, en la Sierra Norte de Puebla y en el estado de Hidalgo.

Las superficies que corresponden a las probabilidades alta, media y baja de distribución potencial actual de la especie se muestran en el Cuadro 2.

According to González (2004), who carried out a study of incidence and severity of *Lophodermium* spp. in *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl and *Pinus maximinoi* H. E. Moore in Guatemala, from August 2003 to January 2004, a high relative humidity (87 to 89 %) favored the development of the pathogen. Furthermore, he suggested that low temperatures (<14 °C) and high relative humidity are decisive factors for spore ripening and release, which increases the risk of infection in pine trees. For their part, Prihatini *et al.* (2015), in Tasmania, identified a community of fungi associated to *Lophodermium* in the needles of *Pinus radiata* Don., with annual precipitations ranging between 714 and 1 439 mm and temperatures of 5.3 to 8.6 °C. Abundant precipitations (>400 y <1 000 mm) and high relative humidity levels favor the growth of the fungus (González, 2004; Prihatini *et al.*, 2015); this agrees with the characteristics of the sites where the pathogen was recorded to occur in the present study.

Current potential distribution of the *Lophodermium* spp. fungus

According to the results, the climate conditions required by *Lophodermium* spp. exist in the Sierra Norte de Puebla; therefore, the pathogen has a great potential of occurring and spreading to new conifer stands, both in Puebla and in Tlaxcala and Hidalgo. Figure 2 shows that the high potential distribution is located mainly in the Sierra Norte de Puebla and in the state of Hidalgo.

The surface areas with low, medium and high probabilities of current potential distribution of the species are shown in Table 2.

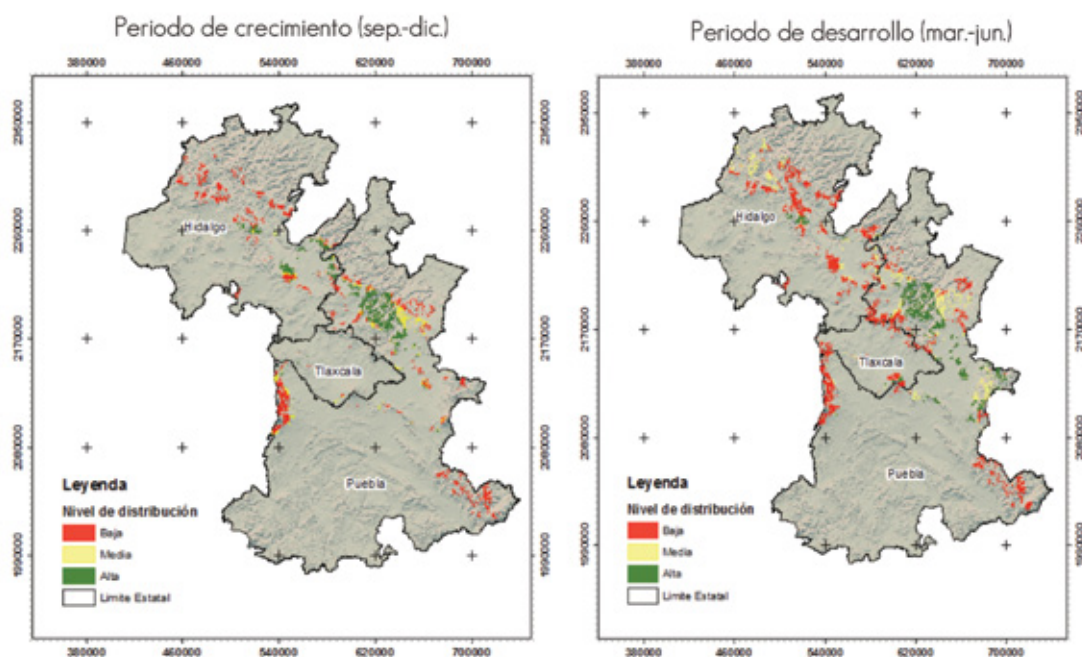
Cuadro 2. Distribución potencial actual (ha) de *Lophodermium* spp. para las dos etapas del ciclo biológico.

Probabilidad de presencia	Etapas de crecimiento	Superficie %	Etapas de desarrollo	Superficie %
Baja	143 018	56.6	240 433	58.0
Media	34 583	13.7	90 55	21.8
Alta	74 829	29.6	83 197	20.1
Total	252 430	100.0	414 188	100.0



Table 2. Current potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. for the two phases of the biological cycle.

Probability of presence	Growth phase	Surface area %	Development phase	Surface area %
Low	143 018	56.6	240 433	58.0
Medium	34 583	13.7	90 55	21.8
High	74 829	29.6	83 197	20.1
Total	252 430	100.0	414 188	100.0



Periodo de crecimiento (sept-dic) = Growth period (Sept.-Dec.); Periodo de desarrollo (mar-jun) = Development period (March-June).
 Figura 2. Distribución potencial actual de *Lophodermium* spp. en su etapa de crecimiento y desarrollo en el área de estudio.

Figure 2. Current potential distribution of *Lophodermium* spp. in the study area, in its growth and development phases.

Para la etapa de crecimiento, 56.6 % de la superficie fue catalogada con baja presencia del hongo y distribución en los estados de Puebla e Hidalgo. La probabilidad media de presencia de *Lophodermium* spp. correspondió a 13.7 % de la superficie; mientras que 29.6 % tiene una alta probabilidad, localizada, en su mayoría, en la Sierra Norte de Puebla y en menor medida en el sureste de Hidalgo.

En la etapa de desarrollo, 58.0 % de la superficie se estimó con baja probabilidad de presencia y se distribuyó, principalmente, en áreas de los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo. La distribución potencial media representa 21.8 % de la superficie y se extiende en Puebla e Hidalgo; la probabilidad de presencia alta fue de 20.1 % y se ubica, sobre todo en la Sierra Norte y centro de Puebla.

During the growth stage, 56.6 % of the surface area was classified as having a low presence of the fungus and a low distribution in the states of Puebla and Hidalgo. The medium probability of presence of *Lophodermium* spp. corresponded to 13.7 % of the surface, while 29.6 % has a high probability, mostly in the Sierra Norte de Puebla and, to a lesser extent, in southeastern Hidalgo.

During the development stage, 58.0 % of the surface was estimated to have a low probability of presence and was distributed mainly in the states of Puebla, Tlaxcala and Hidalgo. The medium potential distribution represents 21.8 % of the surface, in Puebla and Hidalgo; the high probability of presence was 20.1 % and was located mostly in the Sierra Norte and in central Puebla.

La superficie de la distribución potencial actual en etapa de desarrollo correspondió a 60.9 %, del total y 39.1 % a la de crecimiento. Estos resultados sugieren que las condiciones de mayor temperatura y evapotranspiración, así como la menor precipitación y humedad relativa propician el desarrollo de *Lophodermium*. No obstante, en la fase de crecimiento, las condiciones húmedas y de menor temperatura también son adecuadas para su propagación (González, 2004; Alvarado, 2005). Las condiciones frescas y húmedas, además de la alta densidad de plantas favorecen al hongo; asimismo, la presencia de lluvia proporciona humedad suficiente para la apertura de los histerotecios, aunque en condiciones secas igual ocurre (González, 2004; Alvarado, 2005). Lo anterior explica por qué las condiciones climáticas de la Sierra Norte de Puebla, Hidalgo y Tlaxcala son favorables para el crecimiento del hongo, en un periodo más húmedo y fresco, así como su desarrollo cuando el ambiente es más cálido y menos húmedo.

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático de *Lophodermium* spp

Las proyecciones climáticas para el 2039 indican que los valores de las variables en los bosques de coníferas se modificarán, lo cual beneficiará la presencia del hongo en los rodales de la Sierra Norte de Puebla, y municipios de los estados vecinos. Por consiguiente, el hongo tendrá mayores posibilidades de distribuirse en nuevas áreas cubiertas por coníferas, más allá de sus límites actuales.

Condiciones climáticas al 2039 bajo escenario RCP4.5

La temperatura, precipitación y evapotranspiración proyectadas al 2039 bajo el escenario RCP4.5 se resumen en el Cuadro 3. Se observan los contrastes en las diferentes etapas, puesto que uno es periodo húmedo y el otro seco.

Cuadro 3. Caracterización climática bajo escenario de cambio climático RCP4.5 (año 2039) de las etapas de crecimiento y desarrollo del hongo.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (septiembre-diciembre)	17.7 - 18.7	369.4 - 402.6	64.4 - 66.3	84.8 - 86.9
Desarrollo (marzo-junio)	19.6 - 21.2	234.8 - 270.0	81.5 - 83.7	82.4 - 83.3

Table 3. Climate characterization of the growth and development phases of the fungus under climate change scenario RCP4.5 (year 2039).

Phase	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (September-December)	17.7 - 18.7	369.4 - 402.6	64.4 - 66.3	84.8 - 86.9
Development (March-June)	19.6 - 21.2	234.8 - 270.0	81.5 - 83.7	82.4 - 83.3

The surface area of the current potential distribution was 60.9 % of the total in the development phase, and 39.1 % in the growth phase. These results suggest that conditions of higher temperature and evapotranspiration and lower precipitation and relative humidity favor the development of *Lophodermium*. However, during the growth phase, the conditions of high humidity and a lower temperature are also adequate for its propagation (González, 2004; Alvarado, 2005). Cool and humid conditions and a high density of the plants also favor the fungus; furthermore, the presence of rain provides enough humidity for the opening of the histerothecia, although this also occurs under dry conditions (González, 2004; Alvarado, 2005). This explains why the climate conditions of the Sierra Norte de Puebla, Hidalgo and Tlaxcala are favorable for the development of the fungus, in a more humid and cooler period, as well as its development in warmer and less humid environments.

Potential distribution of *Lophodermium* spp. under climate change scenarios

The climate projections for 2039 show that the values of the variables in the conifer forests will change, which will benefit the presence of the fungus in the stands of the Sierra Norte de Puebla and municipalities of the neighboring states. Thus, the fungus will have better possibilities of spreading beyond its present limits to new areas covered by conifers.

Climate conditions by 2039 under scenario RCP4.5

Table 3 summarizes the projected temperature, precipitation and evapotranspiration for the year 2039 under scenario RCP4.5. It also registers the contrasts in the various stages, as one of them is humid while the other is dry.

En el periodo de crecimiento del hongo las diferencias, en promedio, de las variables del tiempo actual al año 2039 con escenario del cambio climático RCP4.5 son notables: cambios positivos en temperatura y humedad relativa de 6.35 °C y 12.3 %, respectivamente; mientras que cambios negativos se observarán en la precipitación (194 mm) y evapotranspiración (225 mm).

En el periodo de desarrollo del hongo, las diferencias en promedio de las variables del tiempo actual al año 2039 serán de igual magnitud. Asimismo, se observarán aumentos en temperatura (6.0 °C) y humedad relativa (12.3 %), y disminuciones en precipitación (196 mm) y evapotranspiración (235 mm).

Los cambios en las variables climáticas a futuro, descritos anteriormente, tendrán repercusión en la distribución potencial de *Lophodermium* spp. para el año 2039, ya que se espera que las condiciones ambientales le serán favorables; en consecuencia, aumentará el riesgo de infección por el hongo en los bosques de coníferas bajo estudio.

Distribución espacial bajo escenario RCP4.5 (año 2039) de *Lophodermium* spp.

La vulnerabilidad de los bosques al ataque del patógeno en los bosques de coníferas en la región bajo estudio es factible, de acuerdo a los resultados obtenidos con el escenario RCP4.5 de cambio climático. Los mapas de distribución potencial para el año 2039, con el escenario RCP4.5 correspondientes a las etapas de crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 3. Se observa que la distribución potencial alta se localiza en la Sierra Norte de Puebla, con dirección al noroeste.

Las superficies que corresponden a las distribuciones potenciales alta, media y baja con escenario de cambio climático RCP4.5 (año 2039) se consignan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución potencial (ha) de *Lophodermium* spp. para el año 2039 bajo escenario RCP4.5 para las dos etapas del ciclo biológico.

Probabilidad de presencia	Etapas de crecimiento	% Superficie	Etapas de desarrollo	% Superficie
Baja	293 208	69.4	213 283	50.6
Media	26 096	6.2	48 829	11.6
Alta	102 895	24.3	159 433	37.8
Total	422 199	100.0	421 54	100.0

Table 4. Potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. for the two phases of the biological cycle by the year 2039 under scenario RCP4.5.

Probability of presence	Growth phase	% Surface area	Development phase	% Surface area
Low	293 208	69.4	213 283	50.6
Medium	26 096	6.2	48 829	11.6
High	102 895	24.3	159 433	37.8
Total	422 199	100.0	421 54	100.0

During the growth period of the fungus, the average differences in the variables between the present time and the year 2039 under climate change scenario RCP4.5 are significant, with positive changes in temperature and relative humidity of 6.35 °C and 12.3 %, respectively, and negative changes in precipitation (194 mm) and evapotranspiration (225 mm).

In the fungus development period, the average differences of the variables of real time to 2039 will have the same magnitude. Also, increase in temperature (6.0 °C) and relative humidity (12.3 %) will be observed, as well as reductions in rain precipitation (196 mm) and evapotranspiration (235 mm).

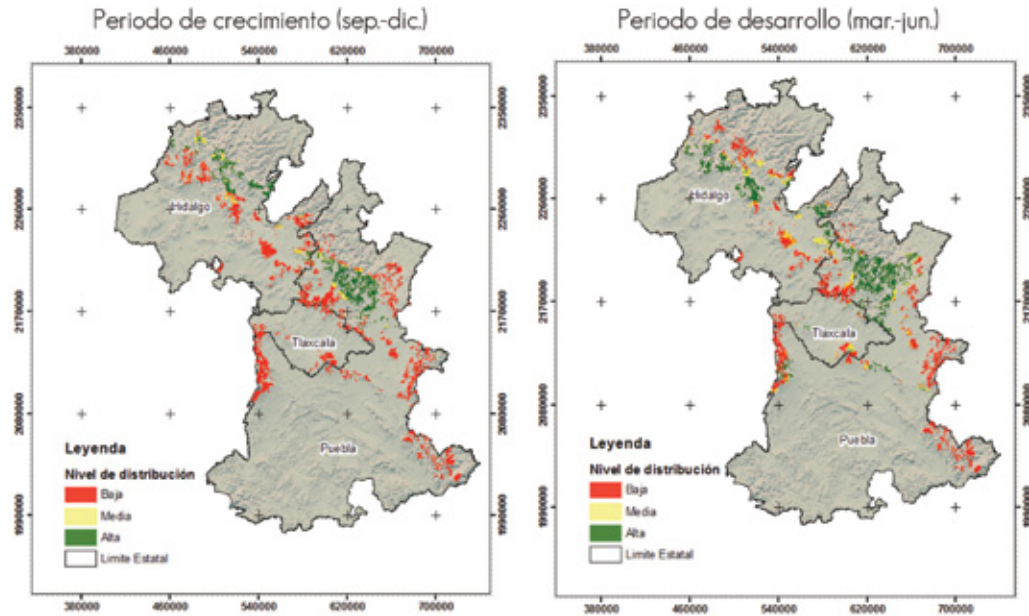
The changes previously described for climate variables in the future will have an impact on the potential distribution of *Lophodermium* spp. for the year 2039, as the environmental conditions are expected to be favorable to it; consequently, the risk of infection by the fungus in the studied forests will increase.

Spatial distribution of *Lophodermium* spp. under scenario RCP4.5 (year 2039)

The forests are likely to be vulnerable to attack by the pathogen in conifer forests in the studied region, according to the results obtained for climate change scenario RCP4.5. Figure 3 shows the potential distribution maps for the growth and development phases by the year 2039, under scenario RCP4.5. A high potential distribution is observed in the Sierra Norte de Puebla, toward the northwest.

Table 4 shows the surface areas corresponding to the high, medium and low potential distributions under climate change scenario RCP4.5 (year 2039).





Periodo de crecimiento (sep.-dic.) = Growth period (Sept.-Dec.); Periodo de desarrollo (mar.-jun.) = Development period (March-June).
 Figura 3. Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en sus etapas de crecimiento y desarrollo para el año 2039 con escenario RCP4.5, en el área de estudio.
 Figure 3. Potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases by the year 2039 in the study area under scenario RCP4.5.

Durante la fase de crecimiento, 69.4 % de la superficie total de distribución del hongo tendrá una probabilidad de presencia baja, dispersa en los tres estados; mientras que la distribución potencial media y alta será de 6.2 % y 24.3 %, respectivamente. Por otra parte, para la fase de desarrollo, la distribución potencial aumenta en la categoría alta y media, pero disminuye en la baja con relación a la fase de crecimiento (Cuadro 4). Las áreas de distribución se mantienen, de acuerdo a los resultados, en la Sierra Norte de Puebla y en la parte central de Hidalgo.

La importancia del riesgo alto por la presencia del patógeno, según el escenario RCP4.5 a nivel municipal en su época de desarrollo, estarán presentes de la siguiente manera: Hidalgo en Meztlán (27 714 ha), Nicolás Flores (17 033 ha), Atotonilco (16 412 ha) y otros; Puebla en Ixtacamaxtitlán (55 690 ha), Aquixtla (53 191 ha), Tepetzintla (48 744 ha) y Zautla (46 926 ha); y Tlaxcala en Alzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha). En la época de crecimiento corresponden a Hidalgo: Eloxochitlán (16 257 ha), Tlahuiltepa (15 235 ha), Metztitlán (15 213 ha), San Agustín Metzquititlán (10 653 ha), Zacualtipán (10 653 ha); en Puebla: Ixtacamaxtitlán (55 014 ha), Aquixtla (43 932 ha), Zacapoaxtla (40 143 ha), Zautla (39 225 ha); y en Tlaxcala no habrá áreas de riesgo alto de presencia.

During the growth phase, 69.4 % of the total distribution of the fungus will have a low probability of presence, scattered in the three states; while the medium and high potential distribution will be 6.2 % 24.3 % and, respectively. On the other hand, the potential distribution increases in the high and medium categories, but decreases in the low category in relation to the growth phase (Table 4). According to the results, the distribution areas remain in the Sierra Norte de Puebla and in central Hidalgo.

Scenario RCP4.5 predicts a high risk due to the presence of the pathogen in its development phase in the following municipalities: Meztlán (27 714 ha), Nicolás Flores (17 033 ha), Atotonilco (16 412 ha) and others, in Hidalgo; Ixtacamaxtitlán (55 690 ha), Aquixtla (53 191 ha), Tepetzintla (48 744 ha) and Zautla (46 926 ha), in Puebla, and Alzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha), in Tlaxcala. As for its growth phase, the municipalities at high risk will be: Eloxochitlán (16 257 ha), Tlahuiltepa (15 235 ha), Metztitlán (15 213 ha), San Agustín Metzquititlán (10 653 ha) and Zacualtipán (10 653 ha), in Hidalgo; Ixtacamaxtitlán (55 014 ha), Aquixtla (43 932 ha), Zacapoaxtla (40 143 ha) and Zautla (39 225 ha), in Puebla; there will be no high risk of the presence of the pathogen in Tlaxcala.



Condiciones climáticas al 2039 bajo escenario RCP8.5

Los valores de temperatura, precipitación y evapotranspiración proyectados al 2039 bajo el escenario RCP8.5 se resumen en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Caracterización climática bajo escenario de cambio climático RCP8.5 (año 2039) de las etapas de crecimiento y desarrollo del hongo.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (sep.-dic.)	18.1 - 19.1	397.0 - 439.9	64.7 - 67.4	88.4 - 89.5
Desarrollo (mar.-jun.)	20.1 - 21.7	244.5 - 302.6	81.7 - 83.4	83.8 - 85.0

Table 5. Climate characterization of the growth and development phases of the fungus under climate change scenario RCP8.5 (year 2039).

Phases	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (Sept.-Dec.)	18.1 - 19.1	397.0 - 439.9	64.7 - 67.4	88.4 - 89.5
Development (March-June)	20.1 - 21.7	244.5 - 302.6	81.7 - 83.4	83.8 - 85.0

En el periodo de crecimiento las diferencias, en promedio, de las variables del tiempo actual al año 2039 son observables: la temperatura tendrá un cambio adicional de 6.95 °C, la precipitación de 148 mm menos, la evapotranspiración de 225 mm menor y la humedad relativa de 17.25 %.

De la misma manera, en el periodo de desarrollo del hongo, las diferencias en promedio de las variables del tiempo actual al año 2039 son considerables, la temperatura tendrá un cambio de 6.75 °C, la precipitación de 170 mm menos, la evapotranspiración de 235 mm menor y la humedad relativa de 26 %.

Distribución espacial bajo escenario RCP8.5 (año 2039) de *Lophodermium* spp.

En el escenario RCP8.5, los bosques de pino serán altamente vulnerables debido al ataque del hongo en la región bajo estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos. Los mapas de distribución potencial para el año 2039 con el escenario RCP8.5, de *Lophodermium* spp. en las etapas de crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 4. De manera general, la distribución potencial alta y media se localizan en la Sierra Norte de Puebla con dirección al noroeste; mientras que la distribución potencial baja se ubica, principalmente, al centro del área de estudio.

Las superficies que corresponden a las probabilidades de alta, media y baja distribución bajo escenario de cambio climático RCP8.5 (año 2039) se integran en el Cuadro 6.

Climate conditions by 2039 under scenario RCP8.5

Table 5 summarizes the temperature, precipitation and evapotranspiration values for the year 2039 under scenario RCP8.5.

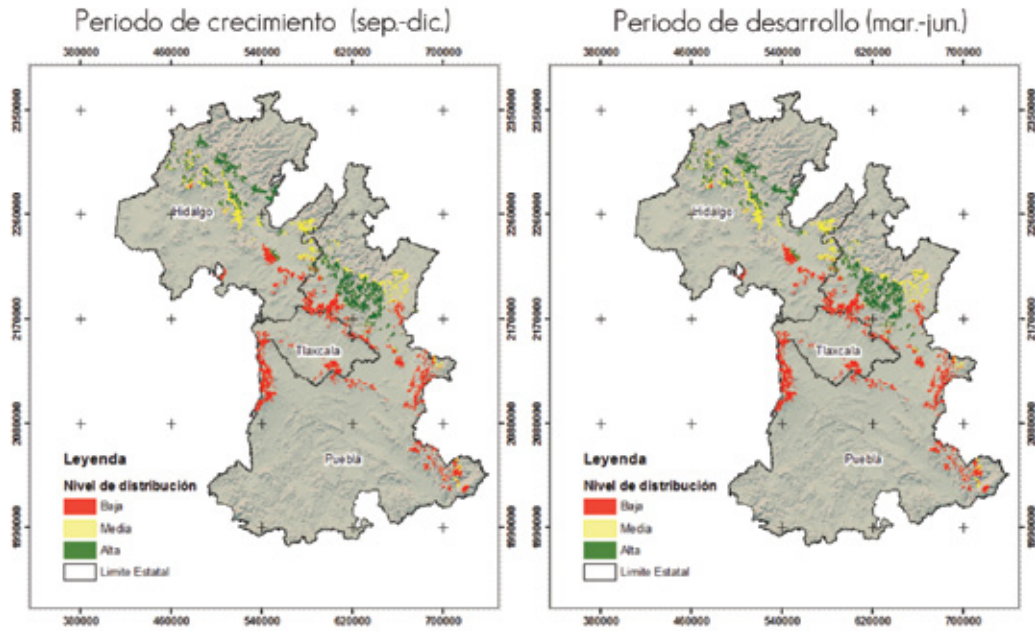
The average differences between the present time and the year 2039 for the growth phase are visible: the temperature will have an additional change of 6.95 °C; the precipitation will decrease by 148 mm; evapotranspiration, by 225 mm, and the relative humidity, by 17.25 %.

Likewise, considerable differences are predicted for the development phase of the fungus between the current time and 2039: the temperature will change by 6.75 °C, and the precipitation will decrease by 170 mm; evotranspiration, by 235 mm, and the relative humidity, by 26 %.

Spatial distribution of *Lophodermium* spp. under scenario RCP8.5 (year 2039)

According to the results obtained for scenario RCP8.5, pine forests will be highly vulnerable due to attack by the fungus in the studied region. Figure 4 shows the potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases maps for the year 2039 under scenario RCP8.5. In general, the high and medium potential distributions are located in the Sierra Norte de Puebla toward the northeast, while the low potential distribution is located mainly at the center of the study area.

The surface areas with high, medium and low probabilities of distribution under climate change scenario RCP8.5 (year 2039) are shown in Table 6.



Periodo de crecimiento (sept-dic) = Growth period (Sept.-Dec); Periodo de desarrollo (mar.-jun) = Development period (March-June)
 Figura 4. Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en sus etapas de crecimiento y desarrollo para el año 2039 con escenario RCP8.5, en el área de estudio.

Figure 4. Potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases in the study area by the year 2039 under scenario RCP8.5.

Cuadro 6. Distribución potencial (ha) de *Lophodermium* spp. para el año 2039 bajo escenario RCP8.5 para las dos etapas del ciclo biológico.

Potencialidad	Etapas de crecimiento	% Superficie	Etapas de desarrollo	% Superficie
Baja	195 358	46.3	258 316	61.3
Media	87 471	20.8	70 381	16.7
Alta	138 810	32.9	92 877	22.0
Total	421 639	100.0	421 574	100.0

Table 6. Potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. In the two phases of the biological cycle for the year 2039 under scenario RCP8.5.

Potentiality	Growth phase	% Surface area	Development phase	% Surface area
Low	195.358	46.3	258.316	61.3
Medium	87.471	20.8	70.381	16.7
High	138.810	32.9	92.877	22.0
Total	421.639	100.0	421.574	100.0

Durante la fase de crecimiento, con el escenario de cambio de climático RCP8.5, 46.3 % de la superficie total tendrá una probabilidad de presencia del hongo baja, mientras que la categoría alta y media representan 32.9 % y 20.8 %, respectivamente. En el caso de la fase de desarrollo de *Lophodermium* spp. la superficie se reduce en la categoría alta y media, y aumenta en la baja con respecto a la fase de crecimiento, como se aprecia en el Cuadro 6.

Under climate change scenario RCP8.5, 46.3 % of the total surface area will have a low probability of presence of the fungus in the growth phase, while the high and medium probabilities represent 32.9 % and 20.8 % of the surface area, respectively. As for the development phase of *Lophodermium* spp., the surface area decreases in the high and medium categories, and increases in the low category with respect to the growth phase, as shown in Table 6.

El escenario RCP8.5 indica que habrá condiciones climáticas adecuadas para la presencia de *Lophodermium* spp. La humedad relativa es cercana y la temperatura superior a las que cita González (2004), 87 % y 14 °C, respectivamente, con un porcentaje de severidad de 42 %.

La importancia del riesgo alto por la presencia del hongo, con el escenario RCP8.5, a nivel municipal en la época de desarrollo del patógeno, estarán dispuestos de la siguiente forma: en Hidalgo, Metztlán (23 728 ha), Tulancingo (12 730 ha), Atotonilco (11 281 ha), Cuauhtepic (10 415 ha); en Puebla, Aquixtla (45 242 ha), Ixtacamaxitlán (41 562 ha), Tepetzintla (39 060 ha), Zautla (36 895 ha), Tetela de Ocampo (36 461 ha), y en Tlaxcala, Altzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha) y Españaita (952 ha). En la época de crecimiento, en Hidalgo: San Agustín Metzquitlán (23 575 ha), Zacualtipán (23 575 ha), Tlahuiltepa (18 887 ha), Metztlán (18 629 ha) y Eloxochitlán (15 475 ha); en Puebla: Ixtacamaxitlán (62 242 ha), Aquixtla (45 032 ha), Zacapoaxtla (41 738 ha), Zautla (41 333 ha), Xochiapulco (41 103 ha) y Tetela de Ocampo (38 670 ha), y en Tlaxcala no habrá alta probabilidad de presencia.

Con base en los resultados de la modelación de la distribución de *Lophodermium* spp. con los escenarios RCP4.5 y 8.5, las condiciones ambientales proyectadas serán favorables para el hongo a finales de la década de los 30, pues habrá un aumento de los bosques de pinos afectados. Las diferencias de superficies entre etapas de desarrollo y crecimiento y entre escenarios, es porcentualmente baja. Lo anterior indica que las variables climáticas de humedad relativa, temperatura y precipitación pronosticadas con los escenarios RCP4.5 y 8.5 son similares a los registrados por González (2004), quien señala una alta incidencia y severidad del hongo.

Los valores obtenidos en este trabajo coinciden con lo documentado por Tchebakova *et al.* (2016), autores que registran, en el corto plazo (año 2020), una mayor cantidad de áreas forestales dañadas por *Lophodermium* spp. Aunque, se utilizaron escenarios de cambio climático diferentes al presente estudio (B1 y A2: modelo HadCm3), citan una tendencia a condiciones favorables para el desarrollo de *Lophodermium* spp. Si bien, no hay comparación para el largo plazo con este trabajo, es importante hacer mención que, según estos autores, para el 2080 habrá una reducción de los bosques dañados, debido a las particularidades del área de estudio que utilizaron.

Por otro lado, los modelos predictivos de distribución de especies han ido en aumento, ya que son una herramienta que permite realizar estimaciones a futuro de manera relativamente precisa (Martínez *et al.*, 2004 citado por Paredes *et al.*, 2011). Dichos modelos generan un área intermedia entre la que ocupa la especie y la potencial (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008), o lo que podría ser una aproximación al área de distribución.

According to scenario RCP8.5, the climate conditions will be adequate for the presence of *Lophodermium* spp. The relative humidity is close to, and the temperature, higher than those cited by González (2004), 87 % and 14 °C, respectively, with a severity percentage of 42 %.

Under scenario RCP8.5, the municipalities with high risk due to the presence of the fungus in its development phase will be: Metztlán (23 728 ha), Tulancingo (12 730 ha), Atotonilco (11 281 ha) and Cuauhtepic (10 415 ha), in Hidalgo; Aquixtla (45 242 ha), Ixtacamaxitlán (41 562 ha), Tepetzintla (39 060 ha), Zautla (36 895 ha) and Tetela de Ocampo (36 461 ha), in Puebla, and Altzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha) and Españaita (952 ha), in Tlaxcala. In the growth phase of the fungus, the municipalities at high risk will be San Agustín Metzquitlán (23 575 ha), Zacualtipán (23 575 ha), Tlahuiltepa (18 887 ha), Metztlán (18 629 ha) and Eloxochitlán (15 475 ha), in Hidalgo, and Ixtacamaxitlán (62 242 ha), Aquixtla (45 032 ha), Zacapoaxtla (41 738 ha), Zautla (41 333 ha), Xochiapulco (41 103 ha) and Tetela de Ocampo (38 670 ha) in Puebla; there will be no high probability of presence of the fungus in Tlaxcala.

Based on the results of the distribution models of *Lophodermium* spp. under scenarios RCP4.5 and 8.5, the projected environmental conditions will be favorable for the fungus in the late 2030s, for the number of affected pine forests will increase. The differences in the surface areas between the development and growth phases and between scenarios is low in terms of percentage. This indicates that the climate variables of relative humidity, temperature and precipitation predicted for scenarios RCP4.5 and 8.5 are similar to those registered by González (2004), who points out a high incidence and severity of the fungus.

The values estimated in this work agree with those obtained by Tchebakova *et al.* (2016), who registered a larger amount of forest areas damaged by *Lophodermium* spp. in the short term (year 2020); although they used different climate change scenarios from those utilized in the present study (B1 and A2: model HadCm3), they cite a tendency toward favorable conditions for the development of *Lophodermium* spp. No comparison was made with this study for the long term; however, we should note that, according to these authors, the surface area of damaged forests will decrease by 2080, due to the particular characteristics of their study area.

On the other hand, the predictive models of species distribution have increased in number, as they are a tool that allows relatively accurate estimations for the future (Martínez *et al.*, 2004 quoted by Paredes *et al.*, 2011). These models generate an intermediate zone between the surface areas currently and potentially occupied by the species (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008), or what might be an approximation to the distribution area.

El algoritmo GARP para la distribución de *Lophodermium* spp. determinó que las áreas donde está presente y las que tienen condiciones óptimas para su desarrollo tienen similitud espacial, e.g. la región Sierra Norte de Puebla para ambas etapas en el periodo actual. Por otro lado, bajo escenarios de cambio climático, los resultados sugieren que el área cuyas condiciones ambientales son favorables para la presencia y desarrollo del hongo serán más amplias. Los escenarios climáticos futuros prevén que la disponibilidad de humedad en los bosques será fuertemente afectada, lo cual tendrá un impacto directo en el ciclo de vida de *Lophodermium*. Esto podría explicarse, a partir de que las temperaturas más cálidas producen mayores pérdidas de agua por evapotranspiración y reducen la capacidad de las plantas para hacer un uso más eficiente del vital líquido (Mortsch, 2006).

Conclusiones

Lophodermium tendrá una distribución potencial amplia en el futuro cercano, debido a los cambios climáticos. Los resultados evidencian que nuevas áreas de bosques de pino serán afectadas, ya que los factores climáticos favorecerán el crecimiento y desarrollo del hongo más allá de donde se distribuye actualmente. Los factores climáticos más importantes que determinan la presencia del hongo en los pinos son las precipitaciones moderadas, temperaturas frías y humedades relativas alta.

El uso del algoritmo GARP permite la determinación cuantitativa de las probabilidades de presencia de *Lophodermium*, actual y con escenarios futuros. Este trabajo representa un esfuerzo para modelar la distribución potencial de *Lophodermium*, a fin de planear con tiempo medidas para mitigar el impacto de este hongo en los recursos forestales del área bajo estudio. 🍃

Agradecimientos

A la Comisión Nacional Forestal por el financiamiento del proyecto "Determinación, distribución y control del agente causal denominado Caída Foliar del Pino en Puebla" y al Sistema Meteorológico Nacional y a la Comisión Nacional del Agua por las facilidades de proporcionar las bases de datos de las estaciones meteorológicas.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno.

Contribución por autor

Ramiro Pérez Miranda: dirección y desarrollo de la investigación, participación en la elaboración del manuscrito; Martín Enrique Romero Sánchez: desarrollo y supervisión del análisis con el modelo GARP, elaboración y revisión del manuscrito; Antonio González Hernández: elaboración de la cartografía base y desarrollo de las capas de información a partir de escenarios de cambio climático; Eduardo Pérez Sosa: desarrollo de los análisis y síntesis de la información, elaboración del manuscrito; Víctor Javier Arriola Padilla: definición de los requerimientos ecológicos del hongo, revisión y análisis de los resultados; así como la elaboración y revisión del escrito.

The GARP algorithm for the distribution of *Lophodermium* spp. determined a spatial similarity between the areas where it occurs and those with optimal conditions for its development, e.g. the region of the *Sierra Norte de Puebla* for both phases at the present time. On the other hand, under climate change scenarios, the results suggest that the surface areas with favorable environmental conditions for the presence and development of the fungus will be wider. Future climate scenarios foresee that the availability of moisture in the forests will be strongly affected; this will have a direct impact on the life cycle of *Lophodermium*. This may be explained by the fact that warmer temperatures produce greater losses of water by evapotranspiration and reduce the ability of the plants to use this vital fluid more efficiently (Mortsch, 2006).

Conclusions

Lophodermium will have a wide potential distribution in the near future due to climate changes. The results show that new areas of the pine forests will be affected, as the climate conditions will favor the growth and development of the fungus beyond its current distribution. The main climate factors determining the presence of the fungus in pine trees are moderate precipitations, cold temperatures and relatively high humidity.

The use of the GARP algorithm allows quantitative determination of the probabilities of presence of *Lophodermium* both currently and under future scenarios. This work represents an effort to model the potential distribution of *Lophodermium* in order to plan timely actions for mitigating the impact of this fungus on the forest resources of the study area. 🍃

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the *Comisión Nacional Forestal* (the National Forestry Commission) for funding the "Determination, distribution and control of the causative agent named Leaf Fall in Pine Trees of Puebla" Project as well as to the *Sistema Meteorológico Nacional* (the National Meteorological System) and to the *Comisión Nacional del Agua* (the National Water Commission) for providing the databases of their weather stations.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Ramiro Pérez Miranda: developed and led the research and participated in the drafting of the manuscript; Martín Enrique Romero Sánchez: development and supervision of the analysis with the GARP model, drafting and revision of the manuscript; Antonio González Hernández: base cartography and development of information layers based on climate change scenarios; Eduardo Pérez Sosa: developed the analyses and the information synthesis and participated in the drafting of the manuscript; Víctor Javier Arriola Padilla: determination of the ecological requirements of the fungus, revision and analysis of the results, drafting and revision of the manuscript.

End of the English version

Referencias

- Alvarado, R. D. 2005. Enfermedades y agentes abióticos en árboles en México: conceptos, diagnosis y manejo. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de Méx., México. 275 p.
- Allen, C. D. 2009. Muerte regresiva del bosque inducida por el clima: ¿un fenómeno mundial en aumento? *Unasylva* 60(231-232):43-49.
- Anderson, R. P., D. Lewc and A. Townsend P. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162:211-232.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto G., A. C. Conde Á., A. Quintanar I., J. S. Santana S., R. Romero C., M. E. Maya M., J. G. Rosario de La C., M. del R. Ayala E., H. Carrillo T., O. Santiesteban y M. E. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC. <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html> (2 de diciembre de 2015).
- Cervantes Z., Y., S. L. Cornejo O., R. Lucero M., J. M. Espinoza R., E. Miranda V. y A. Pineda V. 1990. Provincias Fisiográficas de México. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Vectorial (shp). Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México.
- Cibrián T., D., D. Alvarado R. y S. E. García D. 2007. Enfermedades forestales en México. Forest diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo: CONAFOR-SEMARNAT, México; Forestry Service USDA, EUA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, Edo. de Méx., México. 587 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2015. Temperatura media anual en México (1910-2009), escala: 1:1000000. Vectorial (shp) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F., México. s/p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía Básica. Área de Proyectos y Mercados Forestales de Carbono. Zapopan, Jal., México. 87 p.
- Cordón C., P. R. 2009. Caracterización fitosanitaria de las plantaciones del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) en los Departamentos de Alta Verapaz y el Petén, Guatemala. Tesis Maestría. Programa de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 57 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2016. ArcGIS Desktop. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>. (10 de enero de 2016).
- French, D. W. 1988. Forest and Shade Tree Pathology. University of Minnesota. Department of Plant Pathology. St. Paul, MN, USA. 271 p.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Vectorial (shp). Escala 1:1000000, México. D. F., México. s/p.
- González S., M. L. 2004. Caracterización del complejo de patógenos causales del tizón de la acícula del pino en la Finca Saquichai, Cobán, Alta Verapaz. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos. Guatemala, Guatemala. 42 p.
- Hattemer, H. H. 1964. Geographic variation of resistance to *Lophodermium pinastri* in scots pine. In: Gerhold, H. D., R. E. McDermott and E. J. Schreiner (ed.). *Breeding Pest-Resistant Trees: Proceedings of a NATO and N. S. F. Pennsylvania State University*. Philadelphia, PA, USA. pp. 97-102.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/usuarios/Default.aspx> (26 de enero de 2016).
- Jiménez-Valverde, A., J. M. Lobo and J. Hortal. 2008. Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modeling. *Diversity and Distributions* 14:885-890.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005. Adaptation of forest ecosystems and the forest sector to climate change. Forests and Climate Change Working Paper Num. 2. Rome, Italy. 87 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Bases físicas. Resumen técnico. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wgl/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf (20 de marzo de 2016).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wg2_spm_es.pdf (3 de marzo de 2016).
- Martínez M., E., A. T. Peterson and W. W. Hargrove. 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 13:305-314.
- Martínez, N. 2010. Apuntes sobre modelación de nichos ecológicos. Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental, del Instituto de Ecología de la UNAM. ftp://148.231.212.8/Backups/Eaton/Bibliofesis/Modelado%20de%20nichos/Apuntes_ENM_W.pdf. (17 de diciembre de 2015).
- Menéndez, R. 2007. How are insects responding to global warming? *Tijdschrift voor Entomologie* 150: 335-365.
- Microsoft Corporation. 2000. Manual del programador, Parte 1: Programación en Visual FoxPro 6.0. Redmond, WA, USA. 83p.
- Minter, D. W. 2015. Fungi of Ukraine, Rhytismatales. CABI Bioscience, Bakeham Lane, Egham, Surrey. UK. <http://www.cybertruffle.org.uk/papers/rhytukra/index.htm#abs> (11 de enero de 2016).
- Moore, B. y G. Allard. 2008. Los impactos del cambio climático en la sanidad forestal. Sanidad y Bioseguridad Forestal. FAO. Roma, Italia. 42 p.
- Mortsch, L. D. 2006. Impact of climate change on agriculture, forestry and wetlands. In: Bhatti, J. S., R. Lal, M. J. Apps and M. A. Price (eds.). *Climate change and managed ecosystems*. Taylor and Francis, CRC Press. Boca Ratón, FL, USA. pp. 45-67.
- Paredes G., D. M., A. Ramírez B. and M. A. Martínez M. 2011. Distribución y representatividad de las especies del género *Crotalus* en las áreas naturales protegidas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2): 689-700.
- Prihatini, I., M. Glen, T. J. Wardlaw, D. A. Ratkowsky and C. L. Mohammed. 2015. Needle fungi in young *Tasmanian Pinus radiata* plantations in relation to elevation and rainfall. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 45:25. DOI: 10.1186/s40490-015-0055-6.
- Samaniego, J. L. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile, Chile. 148 p.
- Stockwell, D. R. B. and D. P. Peters. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13:143-158.
- Sturrock, R. N., S. J. Frankelb, A. V. Brownc, P. E. Hennond, J. T. Kliejunasb, K. J. Lewise, J. J. Worrallf and A. J. Woodsg. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology* 60: 133-149.
- Tchebakova, N. M., N. A. Kuzmina, E. I. Parfenova, V. A. Senashova and S. R. Kuzmin 2016. Potential climate-induced distributions of *Lophodermium* needle cast across central Siberia in the 21 century. *Web Ecology* 16: 37-39.



Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38 (1): 55-94.

Vidal Z., R. 1990. Precipitación media anual. En *Precipitación*, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1:4000000. (shp). Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. s/p.

Yanchuk A. y Allard G. 2009. Los programas de mejoramiento de árboles para la salud de los bosques: ¿pueden seguir el mismo ritmo de los cambios climáticos? *Unasyva* 60(231/232):50-56.







Artículo / Article

Crecimiento de *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculada con hongos micorrizogenos arbusculares y rizobacterias

Growth of *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria

Juan Francisco Aguirre-Medina¹, Juan Francisco Aguirre-Cadena², Miguel Antonio Ramón-Castro¹

Resumen

Tabebuia donnell-smithii es un árbol maderable con importancia económica y ecológica en las regiones tropicales de México, cuyas poblaciones naturales han disminuido, debido, entre otras razones, a su lento crecimiento durante su establecimiento. Se investigó en plantas de *Tabebuia* el efecto en su crecimiento y nutrición de la inoculación con *Rhizophagus intraradices*, *Azospirillum brasilense* y *Pseudomonas fluorescens*. El hongo y las bacterias se aplicaron a las semillas en combinaciones de dos o tres de los siguientes microorganismos: *A. brasilense* 9×10^6 UFC g de turba⁻¹, *R. intraradices* con 40 esporas g de suelo estéril⁻¹ y raíces colonizadas al 95 % y *P. fluorescens* con 9×10^6 UFC g de turba⁻¹ más el testigo. Se sembraron en macetas con una mezcla no estéril de suelo Andosol mólico y arena de río lavada, 1:1(v/v). En total se establecieron cinco tratamientos, con cinco repeticiones distribuidas en un diseño completamente al azar. Se realizaron cinco muestreos destructivos: el primero a los 45 días después de la siembra y los siguientes cada 28 días. Se registraron variables morfológicas y fisiológicas del rendimiento. Los tratamientos incrementaron el crecimiento de las plantas, con excepción de las dos bacterias juntas después de 158 días. El correspondiente a *P. fluorescens* - *R. intraradices* y el de los tres microorganismos indujeron más biomasa en el mayor número de componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento. El contenido más alto de N y P en el tejido vegetal se obtuvo con los tres microorganismos y con la combinación *R. intraradices* - *A. brasilense*.

Palabras clave: *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner, biomasa aérea, biomasa radical, inoculación, *Pseudomonas fluorescens* Migula, *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schuessler.

Abstract

Tabebuia donnell-smithii is a timber tree with economic and ecological importance in the tropical regions of Mexico, whose natural populations have declined, due, among other reasons, to its slow growth during its establishment. The effect on their growth and nutrition of the inoculation with *Rhizophagus intraradices*, *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens* was investigated in *Tabebuia* plants. The fungus and bacteria were applied in the seeds in combinations of two or three of the following microorganisms: *A. brasilense* 9×10^6 UFC g of peat⁻¹, *R. intraradices* with 40 spores g of sterile soil⁻¹ and roots 95 % colonized and *P. fluorescens* with 9×10^6 UFC g of peat⁻¹ plus the control. They were sown in pots with a non-sterile mixture of Molic andosol soil and washed river sand, 1: 1 (v / v). In total, five treatments were established, with five replications distributed in a completely randomized design. Five destructive samplings were carried out: the first one at 45 days after sowing and the next every 28 days. Morphological and physiological yield variables were recorded. Treatments increased plant growth, with the exception of the two bacteria together after 158 days. The corresponding to *P. fluorescens* - *R. intraradices* and that of the three microorganisms induced more biomass in the greater number of morphological and physiological components of yield. The highest content of N and P in plant tissue was obtained with the three microorganisms and with the combination *R. intraradices* - *A. brasilense*.

Key words: *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner, aerial biomass, root biomass, inoculation, *Pseudomonas fluorescens* Migula, *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schuessler.

Fecha de recepción/ Reception date: 12 de junio de 2015; Fecha de aceptación/Acceptance date: 6 de julio de 2015.

¹ Facultad de Agronomía. UNACH. Huehuetán, Chiapas.México. Correo-e: juanf56@prodigy.net.mx

² Colegio de Postgraduados. Campus Puebla. México.

Introducción

La interacción entre los componentes de una comunidad microbiana en los sistemas agroforestales puede manifestarse o no, en algún atributo morfológico o fisiológico de interés antropocéntrico de la planta hospedante, especialmente, en sistemas de producción sustentables o de bajos insumos, pero su incidencia efectiva depende del microorganismo, de las condiciones ambientales y edáficas (Qiu *et al.*, 2008). Algunas bacterias y hongos que viven en la porción de suelo influenciado por las raíces estimulan el crecimiento de los vegetales e inducen efectos positivos en su desarrollo y supervivencia (Artursson *et al.*, 2006). Por ejemplo, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y los hongos micorrizógenos arbusculares (MA), que representan dos de los principales grupos de microorganismos benéficos de la rizosfera.

La inoculación con más de un microorganismo a la semilla o al suelo puede poner a disposición de la planta hospedante diversos mecanismos de acción para abastecerse de nutrientes y agua. Varios estudios han demostrado que la inoculación con hongos y bacterias produce un efecto sinérgico (Diouf *et al.*, 2005; Lalitha *et al.*, 2011), aunque en otros casos, no necesariamente induce un efecto aditivo o sinérgico en la planta hospedante (Trabelsi y Mhamdi, 2013).

En México, se han documentado incrementos en el rendimiento y sus componentes en cultivos anuales al inocular hongos (MA) y bacterias fijadoras de nitrógeno bajo condiciones de campo (Aguirre-Medina, 2006). En cultivos perennes, como *Theobroma cacao* L. en vivero, Aguirre-Medina *et al.* (2007) citan mayor desarrollo vegetal cuando se incorporan juntos *R. intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schuessler y *A. brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner. En *Coffea canephora* (Pierre) ex Froehner, el número de hojas y la biomasa del tallo fue superior cuando se usan por separado (Aguirre-Medina *et al.*, 2011).

Los microorganismos inducen aumentos en el crecimiento en menor tiempo en las plantas producidas en vivero, y, en consecuencia, disminuyen el lapso necesario antes de su trasplante en el campo. Esta ventaja se pretende estudiar en *Tabebuia donnell-smithii* Rose (primavera); árbol caducifolio de regiones tropicales y subtropicales de México (Miranda, 1998), cuya madera tiene alta demanda, lo que ha disminuido su abundancia natural, por un aumento en su explotación y regeneración poco exitosa.

Los programas de reforestación en México presentan una supervivencia menor a 50 %, debido, en parte, a la baja calidad de las plantas producidas en vivero y la sequía intermitente que ocurre todos los años (Semarnat, 2010). Bajo estas condiciones, es posible que los microorganismos ayuden a la supervivencia de las plantas en condiciones ambientales adversas (Andrade *et al.*, 2009).

Introduction

The interaction between the elements of a microbe community in the agroforestry systems may or may not become apparent, in some morphological or physiological feature of the host plant of anthropocentric interest, particularly, in sustainable productivity systems or of low income, but its effective incidence depends on the microorganisms, of the environmental and soil conditions (Qiu *et al.*, 2008). Some bacteria and fungi live in the section of the ground influenced by the roots, they stimulate growth of vegetals and induce positive effects in their development and survival (Artursson *et al.*, 2006). For example, by promoting rhizobacteria of vegetal growth and the arbuscular mycorrhizal fungi (MA) that represent two of the most important groups of beneficiary microorganisms of the rhizosphere.

Inoculation with more than one microorganism to the seed or to the soil can make available to the host plant various mechanisms of action to supply nutrients and water. Several studies have shown that inoculation with fungi and bacteria produces a synergistic effect (Diouf *et al.*, 2005; Lalitha *et al.*, 2011), but in other cases it does not necessarily induce an additive or synergistic effect on the host plant (Trabelsi and Mhamdi, 2013).

In Mexico, increases in yield and their components in annual crops have been documented when inoculating fungi (MA) and nitrogen fixing bacteria under field conditions (Aguirre-Medina, 2006). In perennial crops such as *Theobroma cacao* L. in nursery, Aguirre-Medina *et al.* (2007) cite greater plant development when *R. intraradices* (Schenck & Sm.) Walker & Schuessler and *A. brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner were incorporated together. In *Coffea canephora* (Pierre) ex Froehner, leaf number and stem biomass were superior when used separately (Aguirre-Medina *et al.*, 2011).

Microorganisms induce increments in growth in shorter time in plants grown at the nursery, and, in consequence, diminish the necessary lapse before they are transplanted to the field. It is pretended to study this advantage on *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Primavera), a deciduous tree from tropical and subtropical regions of Mexico (Miranda, 1998), that has a highly demanded timber, which has turned into a reduction of its natural abundance, from a greater harvesting and a rather unsuccessful regeneration.

The reforestation programs in Mexico show a survival under 50 %, partly from a poor quality of the plants grown at the nursery and the interrupting drought that occurs every year (Semarnat, 2010). In such conditions, it is possible that microorganisms help in plant survival when adverse environmental conditions prevail (Andrade *et al.*, 2009).



Los hongos (MA) incrementan la absorción de nutrientes, especialmente de fósforo (Richardson *et al.*, 2009), e inducen tolerancia al estrés hídrico (Sylvia, 2005). *Azospirillum* incrementa el desarrollo radical de la planta hospedante, mediante la producción de hormonas y la fijación de nitrógeno (Bashan y De Bashan, 2010); y *P. fluorescens* Migula estimula el crecimiento de las plantas y solubiliza minerales (Lucy *et al.*, 2004).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la asignación de materia seca en *Tabebuia donnell-smithii* en interacción con la inoculación de *Rhizophagus intraradices*, *Pseudomonas fluorescens* y *Azospirillum brasilense*, y su efecto en la concentración de nitrógeno y fósforo en el tejido vegetal.

Materiales y Métodos

Localización geográfica y condiciones ambientales del sitio experimental

La investigación se desarrolló (febrero a noviembre del 2013) en un vivero del Campo Experimental Rosario Izapa-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el km 18 de la carretera Tapachula-Cacaohatan, municipio Tuxtla Chico, Chiapas; con coordenadas son 14°40' N y 92° 10' O, a 435 msnm. En este lugar se colectaron las semillas de *T. donnell-smithii* de árboles de copa densa, fuste recto y sin presencia de daños por plagas y enfermedades. El clima en la zona es cálido húmedo con lluvias en verano e influencia de monzón. La precipitación promedio es de 4 720 mm anuales y la temperatura media, considerada isotermal, de 25.4 °C.

Análisis físicos y químicos del sustrato

El sustrato se conformó con una mezcla de suelo Andosol mólico y arena de río lavada, 1:1 (V/V), cuyas características fueron textura arena-migajonosa (Bouyucos) (80.66 % de arena, 16.36 % de limo, 2.98 % de arcilla), porosidad (34 %), densidad real (209 g mL⁻¹); densidad aparente (1.38 g mL⁻¹); 3.1 % materia orgánica (Walkley-Black); 0.12 dsm⁻¹, conductividad eléctrica; pH 5.71; 0.19 % N (Kjeldhal); 5.0 ppm P (colorimetría); 18.5 ppm K⁺⁺ (espectrofotometría atómica); 59 ppm Ca⁺⁺ (espectrofotometría atómica); 8.1 ppm Mg⁺⁺; y 5 Meq 100g⁻¹ de capacidad de intercambio catiónico. Con el sustrato sin esterilizar se llenaron bolsas de plástico negro (calibre 700), con una capacidad de 5 kg de suelo por bolsa, y se perforaron en la parte inferior para favorecer el drenaje.

Fungi (MA) increase nutrient absorption, phosphorous in particular (Richardson *et al.*, 2009), and they induce tolerance to water stress (Sylvia, 2005). *Azospirillum* stimulates root development of the host plant, through hormones and nitrogen fixing (Bashan and De Bashan, 2010); and *P. fluorescens* Migula stimulates plant growth and makes minerals, soluble (Lucy *et al.*, 2004).

In this context, the aim of the actual study was to determine the allocation of dry matter of *Primavera* interacting with the inoculation of *Rhizophagus intraradices*, *Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense*, and its effect over the nitrogen and phosphorous concentration in vegetal tissue.

Materials and Methods

Location and environment of the experimental site

The actual research took place (February to November 2013) at a nursery of the Experimental Station Rosario Izapa which belongs to the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), located at 18 km of the Tapachula-Cacaohatan highway in the municipality of Tuxtla Chico, Chiapas State between 14°40' N and 92° 10' W at 435 masl. In this place the seeds of *T. donnell-smithii* seeds were collected which came from a dense crown, straight stem and without any signs of plagues or disease. The weather is humid warm in summer and with a monsoon influence. The average precipitation is 4 720 mm a year and the mean temperature, isothermal, of 25.4 °C.

Substrate physical and chemical analysis

The substrate was formed with a mixture of Molic andosol soil and washed river sand, 1: 1 (V / V), whose characteristics were sand-shallow texture (Bouyucos) (80.66 % sand, 16.36 % silt, 2.98 % clay), porosity (34 %), real density (209 g mL⁻¹); bulk density (1.38 g mL⁻¹); 3.1 % organic matter (Walkley-Black); 0.12 dsm⁻¹, electrical conductivity; pH 5.71; 0.19 % N (Kjeldhal); 5.0 ppm P (colorimetry); 18.5 ppm K⁺⁺ (atomic spectrophotometry); 59 ppm Ca⁺⁺ (atomic spectrophotometry); 8.1 ppm Mg⁺⁺; and 5 Meq 100 g⁻¹ cation exchange capacity. Black plastic bags (700 gauge) were filled with the non-sterile substrate, with a capacity of 5 kg of soil per bag, and were drilled in the lower part to favor drainage.



Microorganismos e inoculación

Los microorganismos que se utilizaron fueron *Rhizophagus intraradices*, producido en el Campo Experimental Rosario Izapa-INIFAP. El inóculo contenía 40 esporas por gramo de suelo estéril y raíces de *Brachiaria decumbens* L., con 95 % de colonización. *Azospirillum brasilense* fue adquirido en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con 9×10^6 bacterias g de turba⁻¹. *Pseudomonas fluorescens* fue proporcionada por el Campo Experimental Celaya- INIFAP, con 9×10^6 bacterias g de turba⁻¹. Las semillas se germinaron en charolas con el mismo sustrato y se trasplantaron a las macetas con dos hojas verdaderas. Al momento del trasplante se aplicaron, en el hoyo de siembra, 2 g de cada inóculo mezclado de acuerdo al tratamiento.

Los cinco tratamientos se describen a continuación: 1) *Azospirillum brasilense* + *Pseudomonas fluorescens*; 2) *Rhizophagus intraradices* + *P. fluorescens*; 3) *R. intraradices* + *A. brasilense*; 4) *A. brasilense* + *R. intraradices* + *P. fluorescens*; y 5) Testigo. Se usaron con cinco plantas como repeticiones en un diseño completamente al azar. La unidad experimental fue una maceta con una planta. Los riegos se hicieron con agua destilada.

Variables registradas

Se registraron variables morfológicas y fisiológicas del rendimiento con frecuencia de 28 días después de la siembra (dds); a partir del primer muestreo a los 46 dds, y los siguientes a los 74, 102, 130 y 158 dds. La colonización radical y el contenido de N y P en tejido vegetal se registraron al final del estudio.

La materia seca de la parte aérea y radical de la planta se determinó en estufa de aire forzado por 72 h a 75-80 °C (Sheldon, VWR 1390FM, USA) y los componentes del rendimiento se pesaron en báscula semianalítica (Ohaus, Adventurer Pro, USA).

El área foliar (cm²) se obtuvo con un integrador de área foliar (LI-COR, LI 3000A, USA).

Mediante la técnica de tinción y clareo de Phillips y Hayman (1970) se prepararon 100 segmentos de raíz, con longitud de 1.5-1.6 cm de cada muestreo y se observaron al microscopio óptico con objetivo de inmersión (100 X). Los resultados se expresaron en porcentaje de colonización micorrízica.

Finalmente, los contenidos de N (Micro-Kjeldahl) y P se cuantificaron en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific, modelo 400 $\frac{1}{2}$).

Microorganisms and inoculation

The microorganisms that were used were *Rhizophagus intraradices* produced in the Rosario Izapa Experimental Station of INIFAP. The inoculum contained 40 spores per gram of sterile soil and *Brachiaria decumbens* L. roots with 95 % of colonization. *Azospirillum brasilense* was purchased at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla with 9×10^6 bacteria g of peat⁻¹. *Pseudomonas fluorescens* Migula, was provided by Celaya Experimental Station of INIFAP, with 9×10^6 bacteria g of peat⁻¹. Seeds were germinated in trays with the same substrate and were transplanted to pots with two real leaves. At the time of transplantation, in the sowing hole were applied 2 g of inoculum mixed according to the treatment.

The five treatments are described as follows: 1) *Azospirillum brasilense* + *Pseudomonas fluorescens*; 2) *Rhizophagus intraradices* + *P. fluorescens*; 3) *R. intraradices* + *A. brasilense*; 4) *A. brasilense* + *R. intraradices* + *P. fluorescens*; and 5) Control. They were used with five plants as replications in a completely at random design. The experimental unit was a pot with one plant. Watering was made with distilled water.

Variables in record

Morphological and physiological yield variables were recorded 28 days after sowing (dds); from the first sampling to 46 dds, and the following to 74, 102, 130 and 158 dds. Root colonization and N and P content in plant tissue were recorded at the end of the study.

The aerial and root dry matter of the plant was determined in a forced air oven for 72 h at 75-80 °C (Sheldon, VWR 1390FM, USA) and the performance components were weighed on a semianalytical scale (Ohaus, Adventurer Pro).

The leaf area (cm²) was obtained with a leaf area integrator (LI-COR, LI 3000A, USA).

By the staining and polishing technique of Phillips and Hayman (1970), 100 root segments with a length of 1.5-1.6 cm were prepared from each sample and were observed under optical microscope with immersion objective (100 X). The results were expressed as percentage of mycorrhizal colonization.

Finally, the contents of N (Micro-Kjeldahl) and P were quantified in a spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific, model 400 $\frac{1}{2}$).



Análisis estadístico

Los efectos entre tratamientos se estimaron con un análisis de varianza para las variables morfológicas, fisiológicas, el contenido de nitrógeno y fósforo con el procedimiento PROC ANOVA. Posteriormente, se hizo una comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$) con el programa computacional *Statistical Analysis System*, versión 8.1 (SAS, 1999-2000).

Resultados y Discusión

Altura y área foliar

Los resultados de los diferentes tratamientos se presentan en el Cuadro 1. La inoculación combinada de *R. intraradices*, *A. brasilense* y *P. fluorescens* aumentó significativamente todos los parámetros de crecimiento.

Statistical analysis

The effects between treatments were estimated with an analysis of variance for the morphological, physiological variables, the nitrogen and phosphorus content with the PROC ANOVA procedure. Subsequently, a comparison of means (Tukey, $P \leq 0.05$) was done with the *Statistical Analysis System*, version 8.1 (SAS, 1999-2000).

Results and Discussion

Table 1 shows the results of the different treatments. The *R. intraradices*, *A. brasilense* and *P. fluorescens* combined inoculation significantly increased all the growth parameters.



Cuadro 1. Altura, área foliar y peso seco de raíz y vástago de las plantas de *Tabebuia donnell-smithii* Rose.

Tiempo (dds)	Tratamientos	Altura (cm planta ⁻¹)	Área foliar (cm ² planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	
				Raíz	Vástago
46	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.16 ± 0.07 b*	4.16 ± 0.29 b	0.010 ± 0.0005ab	0.019 ± 0.0009 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.38 ± 0.11 ab	3.45 ± 0.18 b	0.009 ± 0.0005 b	0.017 ± 0.0012 b
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	2.56 ± 0.16 c	3.89 ± 0.25 b	0.010 ± 0.0001ab	0.017 ± 0.0006 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.86 ± 0.15 a	5.47 ± 0.23 a	0.011 ± 0.0002ab	0.025 ± 0.0010 a
	Testigo	3.52 ± 0.15 ab	5.84 ± 0.24 a	0.011 ± 0.0008 a	0.026 ± 0.0004 a
	CV%	9.2	12.0	10.8	9.8
74	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.12 ± 0.29 a	29.02 ± 0.60 b	0.072 ± 0.0028 a	0.137 ± 0.005 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.72 ± 0.24 a	27.88 ± 1.13 b	0.055 ± 0.0013 b	0.124 ± 0.003 b
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	4.98 ± 25 a	25.72 ± 0.55 b	0.014 ± 0.0004 d	0.050 ± 0.002 c
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.18 ± 0.12 a	43.31 ± 2.47 a	0.040 ± 0.0011 c	0.239 ± 0.004 a
	Testigo	4.19 ± 0.18 a	29.74 ± 1.35 b	0.039 ± 0.0030 c	0.129 ± 0.010 b
	CV%	9.9	10.1	10.2	9.6
102	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	8.70 ± 0.37 c	243.95 ± 4.52 c	0.490 ± 0.011 c	0.708 ± 0.020 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	11.40 ± 0.39 ab	258.56 ± 10.0 bc	0.616 ± 0.017 b	1.317 ± 0.053 a
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	10.92 ± 0.11 b	288.18 ± 9.95 b	0.511 ± 0.004bc	0.769 ± 0.040 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	12.66 ± 0.25 a	438.02 ± 6.78 a	1.237 ± 0.059 a	1.295 ± 0.007 a
	Testigo	8.38 ± 0.50 c	243.95 ± 4.29 c	0.441 ± 0.015 c	0.387 ± 0.013 c
	CV%	7.5	6.1	9.8	8.0

Continúa Cuadro 1...



Continúa Cuadro 1..

Tiempo (dds)	Tratamientos	Altura (cm planta ⁻¹)	Área foliar (cm ² planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	
				Raíz	Vástago
130	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	11.80 ± 0.40 c	157.6 ± 4.28 c	0.69 ± 0.01 b	0.790 ± 0.02 d
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	13.80 ± 0.73 ab	326.9 ± 12.29 a	1.29 ± 0.06 a	1.401 ± 0.07 bc
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	12.40 ± 0.24 bc	195.1 ± 4.08 b	0.83 ± 0.01 b	1.502 ± 0.06 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	15.40 ± 0.50 a	303.4 ± 10.62 a	1.15 ± 0.03 a	2.129 ± 0.09 a
	Testigo	11.20 ± 0.37 c	139.6 ± 12.44 c	0.81 ± 0.01 b	1.172 ± 0.01 c
CV%	9.0	9.4	8.4	9.4	
158	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	16.80 ± 0.93 b	729.1 ± 14.2 bc	2.46 ± 0.16 b	4.11 ± 0.07 bc
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	17.70 ± 0.76 b	591.2 ± 27.2 c	3.19 ± 0.02 a	4.77 ± 0.17 ab
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	17.60 ± 0.70 b	727.3 ± 14.1 bc	2.31 ± 0.10 b	3.91 ± 0.26 c
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	21.80 ± 0.66 a	963.6 ± 73.5 a	3.51 ± 0.15 a	4.99 ± 0.08 a
	Testigo	18.20 ± 0.58 b	782.5 ± 20.4 b	2.17 ± 0.08 b	4.05 ± 0.27 bc
CV %	9.8	10.9	9.6	10.0	

dds = Dias después de la siembra; CV = Coeficiente de variación (%).

*Valores con diferente letra dentro de cada factor y columna son estadísticamente diferentes (p ≤ 0.05).

Table 1. Height, foliar area and dry weight of root and stem of *Tabebuia donnell-smithii* Rose plants.

Time (dds)	Treatments	Height (cm plant ⁻¹)	Foliar area (cm ² plant ⁻¹)	Dry weight (g plant ⁻¹)	
				Root	Vástago
46	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.16 ± 0.07 b*	4.16 ± 0.29 b	0.010 ± 0.0005ab	0.019 ± 0.0009 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.38 ± 0.11 ab	3.45 ± 0.18 b	0.009 ± 0.0005 b	0.017 ± 0.0012 b
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	2.56 ± 0.16 c	3.89 ± 0.25 b	0.010 ± 0.0001ab	0.017 ± 0.0006 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	3.86 ± 0.15 a	5.47 ± 0.23 a	0.011 ± 0.0002ab	0.025 ± 0.0010 a
	Control	3.52 ± 0.15 ab	5.84 ± 0.24 a	0.011 ± 0.0008 a	0.026 ± 0.0004 a
CV%	9.2	12.0	10.8	9.8	
74	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.12 ± 0.29 a	29.02 ± 0.60 b	0.072 ± 0.0028 a	0.137 ± 0.005 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.72 ± 0.24 a	27.88 ± 1.13 b	0.055 ± 0.0013 b	0.124 ± 0.003 b
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	4.98 ± 0.25 a	25.72 ± 0.55 b	0.014 ± 0.0004 d	0.050 ± 0.002 c
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	5.18 ± 0.12 a	43.31 ± 2.47 a	0.040 ± 0.0011 c	0.239 ± 0.004 a
	Control	4.19 ± 0.18 a	29.74 ± 1.35 b	0.039 ± 0.0030 c	0.129 ± 0.010 b
CV%	9.9	10.1	10.2	9.6	
102	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	8.70 ± 0.37 c	243.95 ± 4.52 c	0.490 ± 0.011 c	0.708 ± 0.020 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	11.40 ± 0.39 ab	258.56 ± 10.0 bc	0.616 ± 0.017 b	1.317 ± 0.053 a
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	10.92 ± 0.11 b	288.18 ± 9.95 b	0.511 ± 0.004bc	0.769 ± 0.040 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	12.66 ± 0.25 a	438.02 ± 6.78 a	1.237 ± 0.059 a	1.295 ± 0.007 a
	Control	8.38 ± 0.50 c	243.95 ± 4.29 c	0.441 ± 0.015 c	0.387 ± 0.013 c
CV%	7.5	6.1	9.8	8.0	

Continue Table 1..

Continue Table 1...

Time (dds)	Treatments	Height (cm plant ⁻¹)	Foliar area (cm ² plant ⁻¹)	Dry weight (g plant ⁻¹)	
				Root	Vástago
130	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	11.80 ± 0.40 c	157.6 ± 4.28 c	0.69 ± 0.01 b	0.790 ± 0.02 d
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	13.80 ± 0.73 ab	326.9 ± 12.29 a	1.29 ± 0.06 a	1.401 ± 0.07 bc
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	12.40 ± 0.24 bc	195.1 ± 4.08 b	0.83 ± 0.01 b	1.502 ± 0.06 b
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	15.40 ± 0.50 a	303.4 ± 10.62 a	1.15 ± 0.03 a	2.129 ± 0.09 a
	Control	11.20 ± 0.37 c	139.6 ± 12.44 c	0.81 ± 0.01 b	1.172 ± 0.01 c
	CV%	9.0	9.4	8.4	9.4
158	<i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	16.80 ± 0.93 b	729.1 ± 14.2 bc	2.46 ± 0.16 b	4.11 ± 0.07 bc
	<i>R. intraradices</i> + <i>P. fluorescens</i>	17.70 ± 0.76 b	591.2 ± 27.2 c	3.19 ± 0.02 a	4.77 ± 0.17 ab
	<i>A. brasilense</i> + <i>R. intraradices</i>	17.60 ± 0.70 b	727.3 ± 14.1 bc	2.31 ± 0.10 b	3.91 ± 0.26 c
	<i>R. intraradices</i> + <i>A. brasilense</i> + <i>P. fluorescens</i>	21.80 ± 0.66 a	963.6 ± 73.5 a	3.51 ± 0.15 a	4.99 ± 0.08 a
	Control	18.20 ± 0.58 b	782.5 ± 20.4 b	2.17 ± 0.08 b	4.05 ± 0.27 bc
	CV %	9.8	10.9	9.6	10.0

dds = Days after sowing; CV = Coefficient of variation (%).

Values with different letter within each factor and column are statistically different ($p \leq 0.05$).

Las plantas tuvieron lento crecimiento los primeros 45 dds y, en consecuencia, alcanzaron poca altura. A los 28 días se observó incremento en todos los tratamientos. Esta dinámica se repitió en los siguientes muestreos. Las diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) correspondieron a los 46, 102, 130 y 158 dds. Entre los 46 y 74 dds, los tratamientos con los microorganismos presentaron mayor altura de planta en comparación al testigo, y los valores promedio variaron de 1.32 cm, con la inoculación de los tres microorganismos, a 2.42 cm en las plantas tratadas con *R. intraradices* y *A. brasilense*.

En todos los casos el siguiente periodo de evaluación, a los 102 dds, se registró incremento en altura de planta: 4.0 a los 7.0 cm; la mayor altura se obtuvo con la inoculación de los tres microorganismos y la menor con las dos bacterias *A. brasilense* y *P. fluorescens* y el testigo. Después del tercer muestreo y hasta el final de la evaluación, las diferencias en altura fueron superiores a 2 cm en los tratamientos con microorganismos, en comparación con el testigo.

En otras especies perennes como *Theobroma cacao*, Aguirre-Medina *et al.* (2007) señalan que a los 120 dds hay diferencias promedio en altura de planta de 9 cm en las inoculadas con *R. intraradices*, en relación con el testigo. Karthikeyan *et al.* (2009) citan aumento en la altura de planta al inocular las semillas de *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. con *A. brasilense* y *P. fluorescens*; sin embargo, en el presente estudio fue la combinación con menor inducción de altura de planta.

Plants had slow growth the first 45 dds and, consequently, reached low height. At 28 days, an increase in all treatments was observed. This dynamic was repeated in the following samplings. The significant statistical differences ($P \leq 0.05$) corresponded to the 46, 102, 130 and 158 dds. Between 46 and 74 dds, treatments with the microorganisms presented higher plant height compared to the control, and the average values varied from 1.32 cm, with inoculation of the three microorganisms, to 2.42 cm in the plants treated with *R. intraradices* and *A. brasilense*.

In all cases, the next evaluation period, at 102 dds, there was an increase in plant height: 4.0 at 7.0 cm; the highest height was obtained with the inoculation of the three microorganisms and the lowest with the two bacteria *A. brasilense* and *P. fluorescens* and the control. After the third sampling and until the end of the evaluation, differences in height were greater than 2 cm in treatments with microorganisms, compared to the control.

In other perennial species such as *Theobroma cacao* L., Aguirre-Medina *et al.* (2007) indicate that at 120 dds there are average differences in plant height of 9 cm in those inoculated with *R. intraradices*, in relation to the control. Karthikeyan *et al.* (2009) cite increase in plant height by inoculating the seeds of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. with *A. brasilense* and *P. fluorescens*; however, in the present study it was the combination with lower induction of plant height.



En trigo, Naiman *et al.* (2009) muestran efectos diferentes en la utilización de las fuentes de carbono cuando se inoculan *Azospirillum* y *Pseudomonas* e indican su efecto en el crecimiento. Zambrano y Díaz (2008) citan que *A. brasilense* promueve mayor altura de planta en *Gmelina arborea* Roxb con *Glomus manihotis* Howeler, Sieverding & Schenk y *Paraglomus occultum* (Walker) Morton & Redecker. Estos antecedentes sugieren la contrastante funcionalidad de las coinoculaciones en interacción con las plantas (Jäderlund *et al.*, 2008).

El área foliar evidenció valores de crecimiento, estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$) desde el primer muestreo con la simbiosis de los tres microorganismos. Solamente, a los 130 dds con las bacterias *A. brasilense* + *P. fluorescens* presentó diferencia estadística ($P \leq 0.05$). En otras plantas, como el cacao y café con *R. intraradices*, también hay aumento del área foliar en condiciones de vivero (Aguirre-Medina *et al.*, 2007; 2011). Al respecto, Sylvia (2005) cita que las plantas después de la colonización micorrízica incrementan su actividad fotosintética, lo que se expresa en más acumulación de biomasa.

Peso seco de raíz y vástago

La mayor biomasa acumulada en el sistema radical y el vástago durante el primer muestreo se registró con el tratamiento de los tres microorganismos y en el testigo, además fueron estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$) a los otros tratamientos. El lento crecimiento inicial en las plantas inoculadas con dos microorganismos juntos es probable que se relacione con la mayor demanda de fotosintatos por los microorganismos durante la fase de establecimiento, aun cuando, con los tres microorganismos el requerimiento de fuentes de carbono sea mayor y, en consecuencia, el crecimiento inicial es menor. Es posible que la combinación de mecanismos de acción entre los tres microorganismos dependa de la compatibilidad funcional en la fisiología y bioquímica de la interacción, entre los componentes microbianos (Vázquez *et al.*, 2000).

En esta etapa, la disponibilidad de carbohidratos hacia el vástago disminuye, dado que la mayoría de los compuestos son requeridos por la raíz (Roveda y Polo, 2007). Wright *et al.* (2005) documentaron grandes concentraciones de carbohidratos solubles en las raíces micorrizadas de maíz, y agregan que después del periodo de establecimiento de la simbiosis, normalmente, inicia el mecanismo de transporte de nutrientes a la planta y el concomitante incremento en biomasa, como sucedió en los muestreos siguientes con la inoculación de hongos y bacterias.

Los resultados correspondientes a los 102, 130 y 158 dds evidencian que el crecimiento más grande en el sistema radical se presentó al inocular los tres microorganismos juntos. La combinación de bacterias y hongos, *P. fluorescens* + *R. intraradices* mejora el crecimiento radical. *P. fluorescens* puede estimular

In wheat, Naiman *et al.* (2009) show different effects on the use of carbon sources when *Azospirillum* and *Pseudomonas* are inoculated and indicate their effect on growth. Zambrano and Díaz (2008) cite that *A. brasilense* promotes greater plant height in *Gmelina arborea* Roxb with *Glomus manihotis* Howeler, Sieverding & Schenk and *Paraglomus occultum* (Walker) Morton & Redecker. This background suggests the contrasting functionality of co-inoculations in interaction with plants (Jäderlund *et al.*, 2008).

The leaf area evidenced growth values, statistically different ($P \leq 0.05$) from the first sampling with the symbiosis of the three microorganisms. Only, at 130 dds of the *A. brasilense* + *P. fluorescens* bacteria it had a statistical difference ($P \leq 0.05$). In other plants, such as cocoa and coffee with *R. intraradices*, there is also an increase in leaf area under nursery conditions (Aguirre-Medina *et al.*, 2007; 2011). In this regard, Sylvia (2005) cites that plants after mycorrhizal colonization increase their photosynthetic activity, and what is expressed in more accumulation of biomass.

Dry root and stem weight

The highest biomass accumulated in the root system and the stem during the first sampling was recorded with the treatment of the three microorganisms and in the control were also statistically different ($P \leq 0.05$) to the other treatments. The slow initial growth in plants inoculated with two microorganisms together is likely to be related to the increased demand for photosynthates by microorganisms during the establishment phase, even though with the three microorganisms the demand for carbon sources is greater and, consequently, initial growth is lower. It is possible that the combination of mechanisms of action between the three microorganisms depends on the functional compatibility in the physiology and biochemistry of the interaction between the microbial components (Vázquez *et al.*, 2000).

At this stage, the availability of carbohydrates to the stem decreases, since most of the compounds are required by the root (Roveda and Polo, 2007). Wright *et al.* (2005) documented large concentrations of soluble carbohydrates in mycorrhizal roots of maize, adding that after the period of establishment of the symbiosis, normally initiates the mechanism of transport of nutrients to the plant and the concomitant increase in biomass, as happened in the following samplings with the inoculation of fungi and bacteria.

In the samples corresponding to 102, 130 and 158 dds, the largest growth in the root system occurred when inoculating the three microorganisms together. The combination of bacteria and fungi, *P. fluorescens* + *R. intraradices* improves root growth. *P. fluorescens* can stimulate root proliferation (Sánchez *et al.*, 2005) through the production of indoleacetic acid (Patten and Glick, 2002), which is related to the promotion of plant

la proliferación de raíces (Sánchez *et al.*, 2005) mediante la producción de ácido indolacético (Patten y Glick, 2002), el cual se relaciona con la promoción del crecimiento vegetal (Gamalero *et al.*, 2003). La coinoculación con las dos bacterias *A. brasilense* y *P. fluorescens* produjo 30 % menos de biomasa radical y en el testigo 38 % al final del estudio, en comparación con el tratamiento que incluye a los tres microorganismos.

El peso seco del vástago fue superior y estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$) a los otros tratamientos con la inoculación de los tres microorganismos, durante toda la evaluación. En dos muestreos, a los 102 y 158 dds, en el tratamiento con *R. intraradices* + *P. fluorescens* se registró acumulación de biomasa semejante a la observada con la aplicación de los tres microorganismos, pero sin diferencia estadística entre ellos ($P \leq 0.05$). En él se tuvo un comportamiento similar durante el primer muestreo (Cuadro 1).

La coinoculación con las dos bacterias generó menor cantidad de biomasa en raíz y vástago a los 74, 102 y 130 dds, en comparación con los tratamientos integrados por las bacterias en combinación con *R. intraradices*. En ellas no se obtuvo colonización radical por el hongo (MA) al inicio de la evaluación, pero sí a los 74, 102 y 130 dds, con un incremento de alrededor de 20 %; al final de la evaluación, el porcentaje fue de 26.

La colonización micorrízica es posible que corresponda a los hongos (MA) contenidos en el sustrato, cuya presencia se confirma, además, con los porcentajes del testigo (sin inocular). Los hongos (MA) autóctonos indujeron menor desarrollo vegetal en *T. donnell-smithii* y la mayor respuesta vegetal obtenida con *R. intraradices* sugiere efecto diferencial en la capacidad de los hongos para estimular el crecimiento de la planta, aun cuando existe la posibilidad de haber sido colonizada también por hongos (MA) autóctonos (Figura 1).

La coinoculación de *R. intraradices* + *P. fluorescens* propició un mayor incremento en la biomasa seca de raíz y del vástago, en comparación con la combinación *R. intraradices* + *A. brasilense*. El efecto fue más evidente a partir de los 74 y hasta los 158 dds, aunque la colonización micorrízica fue más alta con la combinación *R. intraradices* + *A. brasilense* durante todo el periodo de evaluación, en comparación con la combinación de *R. intraradices* + *P. fluorescens*, en la que se observó poca colonización radical del hongo (MA) al inicio, pero se incrementó cerca de 60 % al final del muestreo.

La coinoculación de las bacterias *A. brasilense* y *P. fluorescens* respondió de manera diferencial con el mismo hongo (MA). Lo anterior sugiere cierta especificidad entre las bacterias y *R. intraradices*. Así, la coinoculación del hongo con la bacteria específica, puede inducir sinergismo en el crecimiento (Trabelsi y Mhamdi, 2013). Con *A. brasilense* la colonización inicial fue

growth (Gamalero *et al.*, 2003). Co-inoculation with the two bacteria *A. brasilense* and *P. fluorescens* produced 30 % less radical biomass and 38 % in the control at the end of the study, compared to the treatment with the three microorganisms.

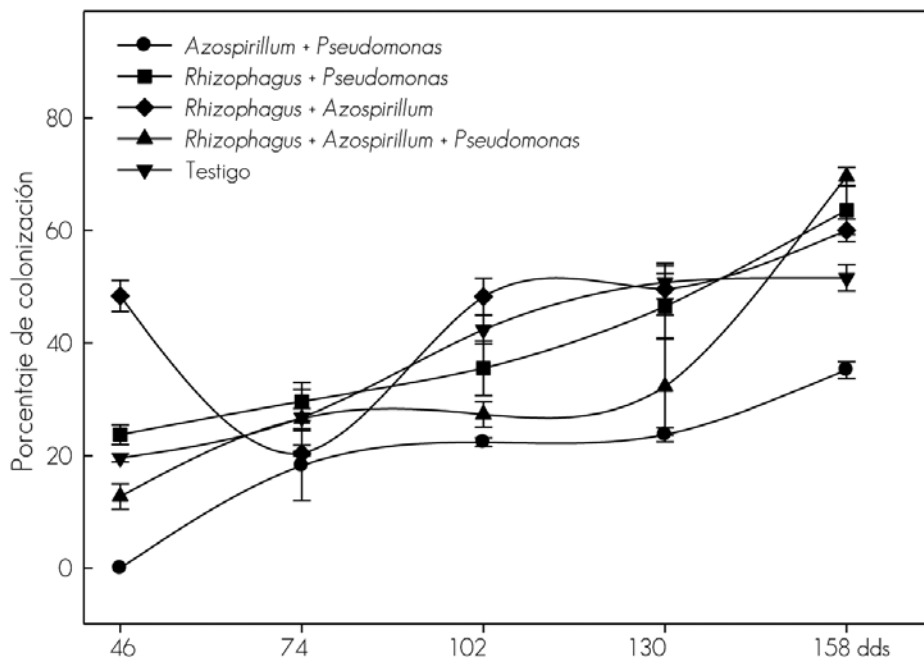
The dry weight of the stem was superior and statistically different ($P \leq 0.05$) to the other treatments with the inoculation of the three microorganisms, throughout the evaluation. In two samples, at 102 and 158 dds, in the treatment with *R. intraradices* + *P. fluorescens* accumulation of biomass similar to that observed with the application of the three microorganisms was found, but without statistical difference between them ($P \leq 0.05$). A similar behavior was observed during the first sampling (Table 1).

The co-inoculation with the two bacteria generated less biomass in root and stem in the samples at 74, 102 and 130 dds, compared to the treatments integrated by the bacteria in combination with *R. intraradices*. No colonization by the fungus (MA) at the beginning of the evaluation was obtained, but at 74, 102 and 130 dds, with an increase of around 20 %, at the end of the evaluation, the percentage was 26.

The mycorrhizal colonization might belong to the fungi in the substrate, whose presence is confirmed in addition, to the percentages of the control (without inoculation). The autoctonous fungi (MA) induced smaller vegetal development of *T. donnell-smithii* and the greater vegetal response obtained from *R. intraradices* suggests a differential effect on the ability of fungi to stimulate plant growth, even when there is a possibility of having been colonized as well by autoctonous fungi (MA) (Figure 1).

The co-inoculation of *R. intraradices* + *P. fluorescens* led to a greater increase in dry biomass of root and stem, compared to the *R. intraradices* + *A. brasilense* combination. The effect was more evident from 74 and 158 dds, although mycorrhizal colonization was higher with the *R. intraradices* + *A. brasilense* combination during the whole evaluation period, when compared to the *R. intraradices* + *P. fluorescens* combination, in which there was little root colonization of the fungus (MA) at the beginning, but increased by about 60 % at the end of sampling.

The co-inoculation of *A. brasilense* and *P. fluorescens* bacteria responded differently with the same fungus (MA). This suggests some specificity between the bacteria and *R. intraradices*. Thus, coinoculation of the fungus with the specific bacterium may induce synergism in growth (Trabelsi and Mhamdi, 2013). With *A. brasilense* the initial colonization was the highest and with *P. fluorescens*, it was at the end of the study, and the same behavior was observed with the inoculation of the two bacteria together with the fungus (MA). In wheat the root growth is increased with *Azospirillum* and radical colonization is not affected when inoculated with *G. mosseae* (Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe and *G. macrocarpum* Tul & Tul (Russo *et al.*, 2005).



La línea vertical indica ± el error estándar de cinco repeticiones.
 The vertical line indicates ± the standard error of five replications.

Figura 1. Colonización micorrízica en la raíz de plantas de *Tabebuia donnell-smithii* Rose.
 Figure 1. Mycorrhizal colonization in the root of *Tabebuia donnell-smithii* Rose plants.

la más alta y con *P. fluorescens*, resultó al final del estudio, y el mismo comportamiento se tuvo con la inoculación de las dos bacterias juntas con el hongo (MA). En trigo aumenta el crecimiento radical con *Azospirillum* y no se afecta la colonización radical, al inocularse junto a *Glomus mosseae* (Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe y *G. macrocarpum* Tul & Tul (Russo *et al.*, 2005).

En los tratamientos con *R. intraradices*, el incremento en el desarrollo de la planta hospedera puede deberse a la mayor absorción de nutrientes, mediante la hifa del hongo. Posiblemente, por el aumento en la capacidad de absorción de las plantas micorrizadas (Leigh *et al.*, 2009), por un efecto estimulador en el desarrollo del micelio, como lo cita Barea *et al.* (1998) con *Pseudomonas* sp. cepa F113 y *G. mosseae*; además de, la fijación de nitrógeno por las bacterias (Hungria *et al.*, 2004). Los resultados confirman la capacidad de colonización de *R. intraradices*, y su efecto en inducir mayor crecimiento de la planta hospedante, en cultivos anuales, como en diferentes variedades de maíz en África (Wright *et al.*, 2005); con maíces criollos, variedades e híbridos en México (Aguirre-Medina 2006); y cultivos perennes, como *Coffea arabica* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2011), *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (Ibarra-Puón *et al.*, 2014) y *Cedrela odorata* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2014).

La colonización micorrízica asociada con las bacterias, no parece estar relacionada con la inducción del desarrollo

In treatments with *R. intraradices*, the increase in the development of the host plant may be due to the greater absorption of nutrients, through the fungus hypha. It is possible from the increase in the absorption capacity of mycorrhized plants (Leigh *et al.*, 2009), due to a stimulatory effect on mycelial development, as stated by Barea *et al.* (1998) with *Pseudomonas* sp. F113 strain and *G. mosseae*; in addition to nitrogen fixation by bacteria (Hungria *et al.*, 2004). Results confirm the ability of *R. intraradices* to colonize, and their effect on inducing higher host plant growth, in annual crops, as well as on different maize varieties in Africa (Wright *et al.*, 2005); with Creole maize, varieties and hybrids in Mexico (Aguirre-Medina, 2006); and perennial crops like *Coffea arabica* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2011), *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (Ibarra-Puón *et al.*, 2014) and *Cedrela odorata* L. (Aguirre-Medina *et al.*, 2014).

Mycorrhizal colonization associated with bacteria does not seem to be related to the induction of plant development of *Tabebuia donnell-smithii*, since it varies according to the combination of the fungus with the bacterium. However, it is expected that mycorrhizal symbiosis presents changes in colonization levels (Sylvia, 2005) due to the interaction of various environmental and management factors (Andrade *et al.*, 2009).



vegetal de *Tabebuia donnell-smithii*, ya que varía de acuerdo a la combinación del hongo con la bacteria. Sin embargo, es de esperarse que la simbiosis micorrízica presente cambios en los niveles de colonización (Sylvia, 2005) debido a la interacción de diversos factores ambientales y de manejo (Andrade *et al.*, 2009).

Existen evidencias de que la micorriza interactúa con una amplia variedad de organismos en la rizosfera, como los diazotófos; aunque, la demanda por carbohidratos aumenta con la coinoculación de más de un microorganismo (Lugtenberg *et al.*, 1999), y se ha estimado que alrededor de 20 % del total de carbono asimilado por la planta es transferido al hongo (Sylvia, 2005). En el estudio que se documenta, el incremento en la acumulación de biomasa en el tratamiento con los tres microorganismos juntos sugiere la compatibilidad funcional de los mismos con la planta hospedante, y que esta abasteció carbono suficiente a los microorganismos.

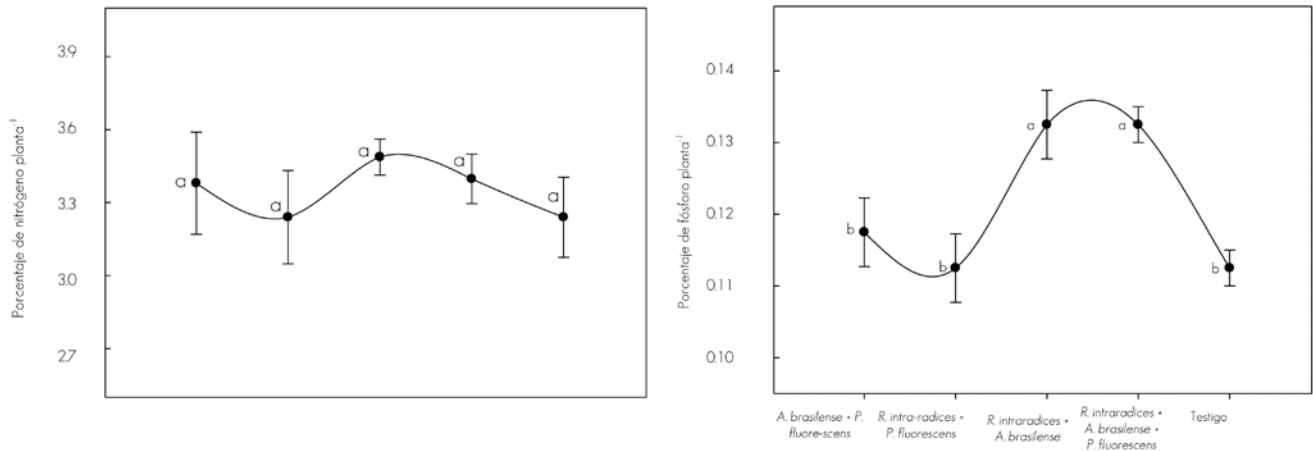
Contenido de N y P

Con respecto a los nutrientes, la Figura 2 muestra los contenidos en *T. donnell-smithii* a los 140 dds.

There is evidence that mycorrhiza interacts with a wide variety of organisms in the rhizosphere, such as diazotrophs; although the demand for carbohydrates increases with the co-inoculation of more than one microorganism (Lugtenberg *et al.*, 1999), and it has been estimated that about 20 % of the total assimilated carbon by the plant is transferred to the fungus (Sylvia, 2005). In the study that is documented, the increase in the accumulation of biomass in the treatment with the three microorganisms together suggests the functional compatibility of them with the host plant, and that it supplied enough carbon to the microorganisms.

N and P content

In regard to nutrients, Figure 2 shows the contents in *T. donnell-smithii* at 140 dds.



La línea vertical indica \pm el error estándar de cinco repeticiones. Letras diferentes son estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Coeficiente de variación en nitrógeno 6.4 % y en fósforo 6.0 %.

The vertical line indicates \pm the standard error of five replicates. Different letters are statistically significant ($P \leq 0.05$). Coefficient of variation in nitrogen 6.4 % and in phosphorus 6.0 %.

Figura 2. Variación del contenido de nitrógeno y fósforo en el tejido vegetal de *Tabebuia donnell-smithii* Rose por tratamiento a los 140 días.

Figure 2. Variation of nitrogen and phosphorus content in the plant tissue of *Tabebuia donnell-smithii* Rose by treatment at 140 days.

El contenido de nitrógeno en el vástago de las plantas inoculadas con *A. brasilense* + *P. fluorescens*, *R. intraradices* + *P. fluorescens*; y los tres microorganismos juntos fue más alto en comparación con el resto de los tratamientos, pero sin diferencia estadística. Este resultado se puede relacionar con la competencia (Neuhauser y Fargione, 2004) o incompatibilidad (Oyekanmi *et al.*, 2007) entre los microorganismos, ya que su incidencia funcional tiene efecto primario en la nutrición vegetal y, en consecuencia, en el crecimiento de la planta (Cano, 2011). Con *Glomus fasciculatum*

The nitrogen content in the stem of the plants inoculated with *A. brasilense* + *P. fluorescens*, *R. intraradices* + *P. fluorescens*; and the three microorganisms together were higher compared to the rest of the treatments, but with no statistical difference. This result can be related to competition (Neuhauser and Fargione, 2004) or incompatibility (Oyekanmi *et al.*, 2007) among microorganisms, since its functional incidence has a primary effect on plant nutrition and, consequently, on the growth of the plant (Cano, 2011). With *Glomus fasciculatum* (Thaxt.) Gerd. and

(Thaxt.) Gerd. & Trappe no se presentó incremento del contenido de nitrógeno en el tejido vegetal de *Astronium graveolens* Jacq., *Tectona grandis* L.f., *Terminalia amazonia* (Gmel.) Exell y *Gmelina arborea* Roxb., pero sí de otros nutrientes (Hernández y Salas, 2009). En diversas investigaciones, la inoculación de *R. intraradices* + *A. brasilense* aumentó el contenido de N en el tejido vegetal de *C. arabica* (Aguirre-Medina *et al.*, 2011).

La mayor concentración de fósforo en el tejido vegetal se registró cuando se coinoculó *R. intraradices* con *A. brasilense* y con los tres microorganismos juntos. Los valores fueron estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Muchos estudios han demostrado que las plantas micorrizadas absorben P del suelo de manera más eficiente que las plantas no colonizadas (Andrade *et al.*, 2009). En *Eleusine coracana* Gaertn inoculada con *Glomus fasciculatum* y *A. brasilense* se consigna mayor absorción de P, en comparación con las plantas testigo (Geeta *et al.*, 2013). Se ha indicado que las hifas fúngicas tienen más afinidad por el ion fosfato cuando su concentración es baja en la solución (Tajini y Drevon, 2012), y en sistemas de producción de pocos insumos, la actividad de la micorriza es más efectiva (Grant *et al.*, 2005), con énfasis en suelos de escasa fertilidad (Mudge, 2003).

La coinoculación de *P. fluorescens* con *R. intraradices* no propició mayor contenido de P en el tejido vegetal. Es probable que este efecto se relacione con la funcionalidad de los dos microorganismos y su efecto en la planta de *T. donnell-smithii*.

Conclusiones

La inoculación de los tres microorganismos juntos incrementó el peso seco de raíz y vástago de *T. donnell-smithii* durante toda la evaluación, y al final de la misma la coinoculación de *R. intraradices* + *P. fluorescens* se expresó en similar acumulación de biomasa. El efecto de las combinaciones de microorganismos en la asignación de materia seca se expresó después de los 74 dds, momento en el cual se incrementó la colonización radical del hongo micorrizógeno arbuscular.

La coinoculación de los tres microorganismos y la coinoculación *R. intraradices* y *A. brasilense* promovieron mayor contenido de N y P en el tejido vegetal.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones por autor

Juan Francisco Aguirre Medina: planeación y diseño de la investigación, toma de datos en muestreos, preparación de muestras para análisis vegetal, colonización radical, formato y revisión del escrito; Juan Francisco Aguirre Cadena: establecimiento y mantenimiento del experimento, preparación de sustrato, llenado de bolsa, riego y muestreos; Miguel Antonio Ramón Castro: colecta de semilla, establecimiento de experimento.

Trappe did not present increase of the nitrogen content in the plant tissue of *Astronium graveolens* Jacq., *Tectona grandis* L.f., *Terminalia amazonia* (Gmel.) Exell and *Gmelina arborea* Roxb., but it did in other nutrients (Hernández and Salas, 2009). In other investigations, inoculation of *R. intraradices* + *A. brasilense* increased the N content in the plant tissue of *C. arabica* (Aguirre-Medina *et al.*, 2011).

The highest phosphorus content in plant tissue was recorded when *R. intraradices* was co-inoculated with *A. brasilense* and with the three microorganisms together. The concentrations were statistically different ($P \leq 0.05$). Many studies have shown that mycorrhizal plants absorb P from soil more efficiently than non-colonized plants (Andrade *et al.*, 2009). In *Eleusine coracana* Gaertn inoculated with *Glomus fasciculatum* and *A. brasilense*, greater uptake of P is recorded compared to control plants (Geeta *et al.*, 2013). It has been reported that fungal hyphae have a higher affinity for phosphate ion when their concentration is low in the solution (Tajini and Drevon, 2012), and in low input production systems, mycorrhizal activity is more effective (Grant *et al.*, 2005), with emphasis on low fertility soils (Mudge, 2003).

Co-inoculation of *P. fluorescens* with *R. intraradices* did not lead to higher P content in plant tissue. It is likely that this effect is related to the functionality of the two microorganisms and their effect on the *T. donnell-smithii* plant.

Conclusions

The inoculation of the three microorganisms together increased the dry weight of the root and the stem of *T. donnell-smithii* along the whole assessment and at the end of it the co-inoculation of *R. intraradices* + *P. fluorescens* expressed itself in a similar biomass accumulation. The effect of the combinations of microorganisms in the asignation of dry matter became apparent after 74 dds, a time at which the root colonization of the arbuscular mycorrhizal fungi increased.

The coinoculation of the three microorganisms and the coinoculation *R. intraradices* and *A. brasilense* promoted a greater content of N and P in the vegetal tissue.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by autor

Juan Francisco Aguirre Medina: research planning and desing, data sampling, sample handling for vegetal analysis, root colonization, structuring and review of the manuscript; Juan Francisco Aguirre Cadena: experiment control and substrate preparation, bag filling, watering and sampling; Miguel Antonio Ramón Castro: seed collection, and establishment of the experiment.

End of the English version

Referencias

- Aguirre-Medina, J. F. 2006. Biofertilizantes microbianos: Experiencias agronómicas del programa nacional del INIFAP en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigaciones Regionales Pacífico Sur-Campo Experimental Rosario Izapa, Rosario-Izapa, Chis., México. 201p.
- Aguirre-Medina, J. F., A. Mendoza-López, J. Cadena-Iñiguez y C. H. Avendaño-Arrazate. 2007. Efecto de la biofertilización en vivero del cacao (*Theobroma cacao*) con *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg & Döbereiner y *Glomus intraradices* Schenk & Smith. *Interciencia* 32(8): 541-546.
- Aguirre-Medina, J. F., D. M. Moroyoqui-Ovilla, A. Mendoza-López, J. Cadena-Iñiguez, J., C. H. Avendaño-Arrazate y J. F. Aguirre-Cadena. 2011. Aplicación de *A. brasilense* y *G. intraradices* a *Coffea arabica* en vivero. *Agronomía Mesoamericana* 22 (1):71-80.
- Aguirre-Medina, J. F., F. O. Mina-Briones, J. Cadena-Iñiguez, J. D. Dardón-Zunun, y D. A. Hernández-Sedas. 2014. Crecimiento de *Cedrela odorata* L. Biofertilizada con *Rhizophagus intraradices* y *Azospirillum brasilense* en vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20 (3):177-186.
- Andrade, S. A. L., P. Mazzafera, M. A. Schiavinato and A. P. D. Silveira. 2009. *Arbuscular mycorrhizal* association in coffee. *Journal of Agricultural Science* 147(2): 105-115.
- Arthursson, V., R. D. Finlay and J. K. Jansson. 2006. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. *Environmental Microbiology* 8(1):1-10.
- Barea, J. M., G. Andrade, V. Bianciotto, D. Dowling, S. Lohrke, P. Bonfante, F. O'gara, F. and C. Azcon-Agular. 1998. Impact on arbuscular mycorrhiza formation of *Pseudomonas* strains used as inoculants for biocontrol of soil-borne fungal plant pathogens. *Applied Environmental Microbiology* 64(6):2304-2307.
- Bashan, Y. and L. E. De-Bashan. 2010. How the Plant Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* Promotes Plant Growth-A Critical Assessment. *Advances in Agronomy* 108:77-136.
- Cano, A. M. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. Una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 14(2):15-31.
- Diouf, D., R. Duponnois, A. T. Ba, M. Neyra and D. Lesueur. 2005. Symbiosis of *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* with mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* spp. improves salt tolerance in greenhouse conditions. *Functional Plant Biology* 32 (12):1143-1152.
- Gamaleri, E., L. Fracchia, M. Cavalletto, J. Garbaye, P. Frey-Klett, G. C. Varese and M. G. Martinotti. 2003. Characterization of functional traits of two fluorescent pseudomonads isolated from basidiomes of ectomycorrhizal fungi. *Soil Biology Biochemistry* 35 (1):55-65.
- Geeta, B. H. C. Patil, H. C. Lakshman, Romana M. Mirdhe and B. S. Agadi. 2013. Effect of co-inoculation of AM fungi and two beneficial microorganisms on growth and nutrient uptake of Eleusine corocana Gaertn. (Finger millet). *Asian Journal of Plant Science and Research* 3(1):26-30.
- Grant, C., S. Bittman, M., Montreal, C. Plenchette and C. Morel. 2005. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science* 85(1):3-14.
- Hernández, W. y E. Salas. 2009. La Inoculación Con *Glomus fasciculatum* en el crecimiento de cuatro especies forestales en vivero y campo. *Agronomía Costarricense* 33(1):17-30.
- Hungria, M., R. J. Campo, E. M. Souza y F. O. Pedrosa. 2004. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant Soil* 331(1-2):413-425.
- Ibarra-Puón, J. C., J. F. Aguirre-Medina, A. Ley-De Coss, J. Cadena-Iñiguez y A. Zavala-Mata. 2014. Inoculación de *Coffea canephora* (Pierre) ex Froehner con *Rhizophagus intraradices* (Schenk et Sm.) Walker et Schuessler y *Azospirillum brasilense* Tarrand, Krieg et Döbereiner en vivero *Revista Chapingo Serie Horticultura* 20(2):201-213.
- Jäderlund, L., V. Arthursson, U. Granhall and J. K. Jansson. 2008. Specific interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria: as revealed by different combinations. *FEMS Microbiology Letters* 287(2): 174-180.
- Karthikeyan, B., A. J. Cheruth and M. M. Azooz. 2009. Individual and Combined Effects of *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens* on Biomass Yield and Amino Acid Production in *Catharanthus roseus*. *Academic Journal of Plant Science* 2 (2):69-73.
- Lalitha, S., K. Rajeshwaran, P. Senthil Kumar and S. Deepa. 2011. Role of AM fungi and rhizobial inoculation for reclamation of phosphorus deficient soil. *Asian Journal of Plant Science* 10(3):227-232.
- Leigh, J., A. Hodge and A. H. Fitter. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. *New Phytologist* 181(1):199-207.
- Lucy, M., E. Reed and B. R. Glick. 2004. Application of free living plant growth promoting rhizobacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek* 86(1):1-25.
- Lugtenberg, B. J. J., L. V. Kravchenko and M. Simons. 1999. Tomato seed and root exudate sugars: composition, utilization by *Pseudomonas* biocontrol strains and role in rhizosphere colonization. *Environmental Microbiology* 1:439-446.
- Miranda, F. 1998. La Vegetación de Chiapas. Edición Gobierno del Estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chis., México. 600p.
- Mudge, S. R., F. W. Smith and A. E. Richardson. 2003. Root-specific and phosphate-regulated expression of phytase under the control of a phosphate transporter promoter enables *Arabidopsis* to grow on pyruvate as a sole P source. *Plant Science* 165(4):871-878.
- Naiman, A. D., A. Latronico and I. E. Garcia de Salamone. 2009. Inoculation of wheat with *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens*: impact on the production and culturable rhizosphere microflora. *European Journal of Soil Biology* 45(1):44-51.
- Neuhauser, C. and J. E. Fargione. 2004. A mutualism-parasitism continuum model and its application to plant-mycorrhizae interactions. *Ecological Modelling* 177:337-352.
- Oyekanni, E. O., D. L. Coyne, O. E. Fagade and O. Osonubi. 2007. Improving root-knot nematode management on two soybean genotypes through the application of *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma pseudokoningii* and *Glomus mosseae* in full factorial combinations. *Crop Protection* 26: 1006-1012.
- Patten, C. L. and B. R. Glick. 2002. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied Environmental Microbiology* 68(8):3795-3801.
- Phillips, J. M. and D. S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *The British Mycology Society* 55(1): 58-161.
- Qiu, M. Q., H. Zhang, G. X. Wang and Z. Q. Liu. 2008. Effects of nitrogen on plant-microorganism interaction. *EurAsian Journal of BioScience* 2:34-42.
- Richardson, A. E., J. M. Barea, A. M. Mc Neill and C. Prigent-Combaret. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321:305-339.
- Roveda, R. y C. Polo. 2007. Mecanismos de adaptación de maíz asociado a *Rhizophagus* spp. en suelos con bajo fósforo disponible. *Agronomía Colombiana* 25(2): 349-356.
- Russo, A., M. Götz, C. Felici, C. Collados, Y. Moënn-Loccoz, J. Vanderleyden, A. Toffanin, J. M. Barea, K. Smalla and M. Nuti. 2005. Effect of *Azospirillum* inoculants on arbuscular mycorrhiza establishment in wheat and maize plants. *Biology Fertility Soils* 41(5):301-309.
- Sánchez, L., S. Weidmann, C. Arnould, A. R. Bernard, S. Gianinazzi and V. Gianinazzi-Pearson. 2005. *Pseudomonas fluorescens* and *Glomus mosseae* Trigger DMI3-Dependent Activation of Genes Related to a Signal Transduction Pathway in Roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology* 139(2):1065-1077.

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (Semarnat). 2010. Informe de evaluación externa de los apoyos de reforestación, ejercicio fiscal 2009. Comisión Forestal. México, D.F., México. 140p.

Statistical Analysis System (SAS). 1999-2000. SAS/STAT User's Guide. Ver 8.1 SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.

Sylvia, M. D. Mycorrhizal symbioses. 2005. In: Sylvia, M. D., J. J. Fuhrmann, G. P. Harte and A. D. Zuberer. (ed.). Principles and Applications of Soil Microbiology. Second Edition. Upper Saddle River, NJ, USA. Pearson Prentice Hall. pp. 263-282.

Tajini, F. and J. J. Drevon. 2012. Phosphorus use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as related to compatibility of association among arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia. *African Journal of Biotechnology* 11(58):12173-12182.

Trabelsi, D. and R. Mhamdi. 2013. Microbial Inoculants and Their Impact on Soil Microbial Communities: A Review. *BioMed Research International*. doi:10.1155/2013/863240.

Vázquez, M. M., S. César, R. Azcón and J. M. Barea. 2000. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Applied Soil Ecology* 15:261-272.

Wright, D. P., J. D. Scholes, D. J. Read and S. A. Rolfe. 2005. European and African maize cultivars differ in their physiological and molecular responses to mycorrhizal infection. *New Phytologist* 167(3):881-896.

Zambrano, J. A. y L. A. Díaz. 2008. Efecto de la inoculación de *Azospirillum brasilense* y *Glomus* sp. en *Gmelina arborea* durante su germinación y manejo en vivero. *Universitas Scientiarum* 13(2):162-170.





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 Rivery

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 Sáenz 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 Irabién
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 Nolazco, 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. Abisai 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 Reyer 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 36 de la
*Revista Mexicana de Ciencias
Forestales*, es una versión íntegra y
fiel de la impresa en julio 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. 36 2016

Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota
Forest parameter estimation in conifer forests using remote sensing techniques

Fusarium oxysporum Schldl. y *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. causantes de la marchitez de plántulas de *Pinus* spp. en vivero
Fusarium oxysporum Schldl. and *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. cause wilting of *Pinus* spp. seedlings in the nursery

Rendimiento en calidad de la madera aserrada de pino
Pine lumber grade recovery as a function of log characteristics

Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios
Biomass in bushes, weeds and on the forest floor as a risk factor of fires

Calidad de planta de *Cedrela odorata* L. asociada con prácticas culturales de vivero
Plant quality of *Cedrela odorata* L. associated with nursery cultural practices

Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en bosques de coníferas, con escenarios de cambio climático
Potential distribution of *Lophodermium* spp. in conifer forests, with climate change scenarios

Crecimiento de *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculada con hongos micorrizogenos arbusculares y rizobacterias
Growth of *Tabebuia donnell-smithii* Rose inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria