



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES,  
UNIDAD MORELIA**

*Almacenes de carbono en bosques a lo largo de  
gradientes ambientales en las Serranías  
Occidentales de Jalisco, México*

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**P R E S E N T A :**

**CRISTOPHER DANIEL ORTEGA MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. CESAR ANDRES TORRES MIRANDA**

**CO-TUTOR  
DR. MIGUEL ANGEL SALINAS MELGOZA**

**ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES**  
  
**UNIDAD MORELIA**

**MORELIA, MICHOACAN, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 04** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **11 de abril del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno(a) **Cristopher Daniel Ortega Martínez** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **4141059638**, con la tesis titulada: "Almacenes de carbono en bosques a lo largo de gradientes ambientales en las Serranías Occidentales de Jalisco, México", bajo la dirección como **tutor** del Dr. Cesar Andrés Torres Miranda y como **co-tutor** del Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** Dr. Felipe Francisco García Oliva  
**Vocal:** M. en C. René David Martínez Bravo  
**Secretario:** Dr. César Andrés Torres Mirada  
**Suplente:** Dr. Carlos Alberto García Bustamante  
**Suplente:** Dr. Ricardo Musule Lagunes

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 29 de octubre del 2018.

  
**DR. VÍCTOR HÚGO ANAYA MUÑOZ**  
SECRETARIO GENERAL

---

**CAMPUS MORELIA**  
Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guadalupe), 58090, Morelia, Michoacán  
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

### Agradecimientos institucionales

Agradezco el financiamiento UNAM otorgado para la realización de esta tesis mediante los proyectos *PAPIIT IV201015*, *PAPIIT IA208218* y *PAPIME PE213517*.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en particular a la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia por el apoyo académico, económico y por la gran experiencia de vida que es el pertenecer a la casa de estudios más grande y especial de México.

A los integrantes del jurado, en especial al Dr. Felipe García Oliva por sus aportaciones y consejos que llevaron a lograr un mejor trabajo.

A los integrantes del laboratorio de Biogeografía de la Conservación y Cambio Global, en especial a la M. en C. Maribel Arenas por haberme apoyado y haberme aconsejado de la mejor manera. Y porque sin su apoyo esta tesis no se hubiera realizado de esta forma.

A mis dos tutores el Dr. Cesar Andrés Torres Miranda y el Dr. Miguel Ángel Salinas Melgoza por haberme aceptado como su estudiante y por dar todo su empeño en moldearme a base de mucho esfuerzo, constancia y dedicación para así llegar a convertirme en un profesionalista de calidad. A ustedes mi más grande admiración y gratitud.

### Agradecimientos personales

A mis compañeras y colegas Ximena García, Dania Alcantar y Gloria Meráz por ser grandes amigas y compañeras durante el desarrollo de la licenciatura.

A mis compañeros y colegas Marco Polo Hernández y Javier Piña por haber ayudado sin esperar nada a cambio en la realización de esta tesis. Y por haber pasado conmigo todas las vivencias de la licenciatura.

A mis amigos de toda la vida Cesar y Pablo López, Daniel Cazares, Alonso Domínguez, Carlos Basan y Carlos Razó por haber estado siempre a mi lado por más de 10 años y siempre haberme brindado un gran apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

A Alejandra Mejía por ser una gran compañera en este proceso y por demostrar siempre un apoyo incansable para la realización de mis metas.

A mis tios Yvonne Martínez y Rafael Martínez por estar de forma incondicional conmigo y apoyarme en todo momento.

A mi amado hermano Liam Ortega Martínez que siempre ha estado a mi lado y que sin su compañía todos estos años no sería la persona que soy ahora. Mi más sincero agradecimiento.

A mi madre y padre, Karen Martínez y Oliver Ortega por su infinito apoyo y cariño. Por haber estado siempre a mi lado e incentivarme constantemente a ser una mejor persona. Superando siempre, todas las adversidades para lograr todas mis metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mis abuelos paternos Elvira Méndez y Gustavo Ortega, que gracias a sus consejos y su experiencia han logrado dejar una huella muy especial en mí. Y en especial a mis abuelos maternos Guadalupe Chávez y Rafael Martínez a los que agradezco infinitamente todo su apoyo, amor y dedicación en vida, este logro es para ellos.

*Dedicatoria*

A mis abuelos maternos Guadalupe Chavez Zavala y Rafel Martínez Cervantes.

A mi hermano Liam Ortega Martínez.

En especial a mi madre Karen Martínez Chavez.

## Índice

Resumen .....	11
Abstract.....	13
Introducción.....	15
Antecedentes.....	16
Características generales de los bosques templados.....	16
Características de los bosques de pino y encino en México.....	17
Deforestación y emisiones de los bosques en México .....	19
Almacenes de carbono y los factores que los controlan.....	20
Carbono en biomasa arbórea en BT de México .....	21
Carbono en suelos en BT de México.....	24
Modelos alométricos para la estimación de biomasa arbórea .....	26
Efectos de los gradientes ambientales en los patrones de distribución de la biomasa .....	27
Patrones de diversidad vegetal en función de la altitud.....	28
Justificación.....	29
Preguntas de investigación .....	29
Hipótesis nula .....	30
Hipótesis de trabajo .....	30
Objetivos.....	31
Objetivo general: .....	31
Objetivos particulares:.....	31
Materiales y métodos.....	31
Área de estudio .....	31
Muestreos de vegetación .....	34
Estructura diamétrica del bosque.....	37

Índice de diversidad de Shannon-Wiener.....	37
Estimación de carbono en biomasa arbórea .....	38
Muestreo y estimación de carbono total en suelos .....	39
Índice de aridez UNEP .....	40
Modelo lineal generalizado .....	41
Resultados.....	42
Estructura diamétrica del bosque.....	43
Análisis de diversidad en las Serranías Occidentales.....	51
Almacén de carbono en biomasa arbórea en las Serranías Occidentales .....	52
Almacén de carbono en suelos en las Serranías Occidentales.....	53
Análisis estadístico: efecto de los gradientes ambientales en el carbono en biomasa arbórea .....	54
Análisis estadístico: efecto de los gradientes ambientales en el carbono en suelo.....	57
Análisis estadístico: relación entre el carbono en la biomasa arbórea y en los suelos .....	59
Almacén de carbono en coníferas y encinos .....	60
Discusión .....	66
Contenidos de carbono almacenados en la biomasa arbórea y los suelos para las Serranías Occidentales de Jalisco.....	66
Almacén de carbono en la biomasa arbórea y los suelos en relación con el gradiente ambiental .....	67
Relación entre el carbono en la biomasa arbórea y los suelos.....	69
Carbono en coníferas y encinos.....	70
Alometría y análisis de sensibilidad .....	71
Conclusiones.....	73
Recomendaciones .....	73
Bibliografía.....	75

Anexos.....	83
-------------	----

## **Índice de cuadros**

<b>Cuadro 1.</b> Valores de contenido carbono en biomasa arbórea reportados en distintos estudios realizados en bosques templados de México.....	22
<b>Cuadro 2.</b> Valores de carbono en suelos reportados en distintos estudios para los bosques templados de México.....	25
<b>Cuadro 3.</b> Ubicación de los transectos en el gradiente altitudinal. ....	36
<b>Cuadro 4.</b> Fórmulas alométricas y ecuaciones para la estimación de biomasa arbórea.....	39
<b>Cuadro 5.</b> Clases de aridez con base en el índice propuesto por la UNEP (1992).....	41
<b>Cuadro 6.</b> Resumen de datos de temperatura, precipitación e índice de aridez por transecto. ....	42
<b>Cuadro 7.</b> Resumen de datos por transecto indicando el tipo de vegetación, número de individuos registrados, clases diamétricas encontradas, clase diamétrica más abundante y diámetro a la altura del pecho (promedio y su desviación estándar).....	44
<b>Cuadro 8.</b> Resumen de datos por familia vegetal indicando número de individuos registrados y diámetro a la altura del pecho (promedio, Mín.=mínimo, Máx.=máximo y su desviación estándar). ....	48
<b>Cuadro 9.</b> Resumen de datos de diámetro a la altura del pecho en especies de la familia Fagaceae y las coníferas (promedio, Mín.=mínimo, Máx.=máximo) Entre paréntesis desviación estándar del DAP.....	50
<b>Cuadro 10.</b> Contenido de carbono por transecto para el G1 y G2. ....	52
<b>Cuadro 11.</b> Resultados de carbono en suelos por transecto para los primeros 20 cm del suelo.....	53
<b>Cuadro 12.</b> Resumen estadístico de la relación entre el carbono en biomasa arbórea con la altitud y el IA.....	56
<b>Cuadro 13.</b> Resumen estadístico de la relación del carbono en suelo con la altitud y el IA. ....	58
<b>Cuadro 14.</b> Resumen estadístico de la relación del carbono en biomasa arbórea y carbono en suelo. ....	59

<b>Cuadro 15.</b> Estimación y aportación de carbono por parte de los Quercus en ambas secciones al almacén de carbono.....	60
<b>Cuadro 16.</b> Promedio de carbono por individuo de acuerdo a la fórmula alométrica en la zona de estudio. ....	62

### Indice de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio. Elaboró M en C Miguel Ángel Salinas Melgoza con datos de (INEGI 2016).....	32
<b>Figura 2.</b> Perfil altitudinal y topográfico de la zona de estudio. Obtenido en Google Earth. ....	34
<b>Figura 3.</b> Dominios climáticos y ubicación de los 25 transectos en la zona de estudio. Datos de Arenas-Navarro et al. (En preparación).....	35
<b>Figura 4.</b> Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho en el área de estudio. ....	45
<b>Figura 5.</b> Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho en el sitio de estudio. ....	46
<b>Figura 6.</b> Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho por familia vegetal.	47
<b>Figura 7.</b> Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho para las secciones de la familia Fagaceae. ....	49
<b>Figura 8.</b> Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho de las especies de la familia Fagaceae y las coníferas.....	51
<b>Figura 9.</b> Relación entre altitud y el carbono en biomasa arbórea estimado en ambos grupos de fórmulas alométricas: A) G1y B) G2.....	55
<b>Figura 10.</b> Efectos del IA en el carbono en biomasa arbórea en ambos grupos de fórmulas alométricas: A) G1 y B) G2. ....	56
<b>Figura 11.</b> Relación entre altitud y el carbono total en suelos.....	57
<b>Figura 12.</b> Efectos de la aridez en el carbono total en suelo. ....	58
<b>Figura 13.</b> Efectos del carbono en biomasa arbórea en el carbono en suelo en función de los dos grupos de fórmulas alométricas: A) G1y B) G2. ....	59
<b>Figura 14.</b> Prueba de sensibilidad de DAP arbitrario entre ecuaciones de Navar (2009) y Aguilar et al (2012). ....	64

**Figura 15.** Prueba de sensibilidad de carbono en cada transecto por categoría diamétrica entre ecuaciones de Navar (2009) y Aguilar et al (2012)..... 65

**Anexos**

**Anexo 1.** Promedio, máximo y mínimo de la altitud y promedio del DAP de especies de coníferas y los Quercus..... 83

## Resumen

Estimar los almacenes de carbono (C) e identificar los factores que los determinan es fundamental para proponer estrategias efectivas de mitigación al cambio climático. El objetivo de este estudio fue analizar los almacenes de carbono en biomasa arbórea y suelos de los bosques pertenecientes a las Serranías Occidentales de Jalisco, México, evaluando si existe una relación entre ambos, así como el efecto que tienen sobre ellos los gradientes ambientales como la altitud y aridez. Para la biomasa arbórea se realizaron 25 transectos de 0.1 ha, establecidos de manera aleatoria a lo largo del gradiente altitudinal que comprendía 800 a 2500 msnm. El carbono en suelo de cada transecto fue obtenido mediante muestras de suelo de los primeros 20 cm de profundidad. Para obtener el carbono almacenado en la biomasa arbórea, se usaron dos grupos de ecuaciones alométricas. Adicionalmente, para cada transecto se estimaron también la diversidad vegetal mediante el índice de Shannon-Wiener y el índice de aridez UNEP. Se realizó un análisis de sensibilidad para identificar que tan confiables son las estimaciones de carbono con las fórmulas alométricas empleadas. Se evaluó la relación entre los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelo, así como el efecto de tres gradientes ambientales en ellos mediante modelos lineales generalizados, usando como variables independientes la altitud, la aridez y la diversidad vegetal y como variables dependientes el carbono en biomasa arbórea y carbono en suelos. El análisis de sensibilidad mostró que las estimaciones de biomasa fueron diferentes entre ecuaciones alométricas, sobretodo, en individuos de grandes tallas. La estructura diamétrica se analizó a cuatro niveles de agregación; 1) entre los tipos de vegetación, 2) para las dos familias arbóreas principales, 3) entre secciones del género *Quercus* y 4) entre especies del género *Quercus*.

El almacén de carbono en biomasa arbórea en el área de estudio fue entre 19.51-202.90 Mg C ha<sup>-1</sup>. El carbono en suelo varió entre 5.96 a 82.54 Mg C ha<sup>-1</sup>. Las coníferas fueron el grupo de especies con la mayor cantidad de carbono almacenado en biomasa arbórea, seguido por los encinos. Nuestros resultados sugieren que el clima en la zona de estudio ejerce un efecto que provoca diferencias en ambos almacenes de carbono, siendo las partes más altas y húmedas con mayor cantidad de carbono, en comparación con las partes más bajas y secas con menores concentraciones de carbono.

Para las coníferas y Fagáceas, la mayoría de sus individuos pertenecían a la categoría diamétrica más pequeña, entre 0-20 cm de DAP. Se probó que existe una relación significativa entre el almacén de carbono en biomasa arbórea y carbono total en el suelo. Se encontró una relación positiva entre la altitud, el índice de aridez y ambos almacenes de carbono estimadas. Estos resultados podrían tener consecuencias en dos sentidos. Por un lado, para proponer planes de manejo forestal integrado que promuevan el crecimiento de individuos en clases de diámetros pequeños, las diferencias en los gradientes ambientales deben ser consideradas. Por otro lado, los cambios drásticos en los regímenes térmicos y de humedad presentes en el área podrían impactar fuertemente a los individuos pequeños y afectar los futuros reemplazos de los individuos con dosel. Mis resultados también sugieren que las estimaciones de biomasa obtenidas para individuos arbóreos, cuyos diámetros están fuera del rango en el que se construyó el modelo alométrico usado, podrían no ser exactas. Los resultados de carbono en el suelo pueden relacionarse con el hecho de que los suelos del área de estudio tienen muchas rocas en proceso de meteorización, lo que no permite la acumulación de carbono en el suelo.

## Abstract

Know what factors determine forest carbon stocks are fundamental to propose mitigation strategies to climate change. Unraveling these patterns will help to propose strategies to face climate change in a more effective way. The aim of this study was to evaluate if there is a relationship between tree and soil C stocks with environmental gradients belonging to the Serranías Occidentales de Jalisco, Mexico. Carbon in aboveground biomass (AGC) and soil (SC) were obtained. For AGC, 25 0.1 ha plots were established in a random way along an altitudinal gradient, which varied between 800 and 2500 m a.s.l. Allometric equations were used to obtain AGC. A sensitivity analysis was carried out to identify how variable the carbon estimates were with the allometric equations used. The sensitivity analysis showed that the biomass estimates were different between allometric equations and that this effect was greater for individuals of higher sizes. The forest diametric structure was analyzed at four levels of aggregation, 1) among vegetation types, 2) for the two main tree families, 3) between *Quercus* sections and 4) between *Quercus* species. For conifers and Fagaceas, most of their individuals belonged to the smallest diameter category, between 0-20 cm of DAP. The SC of each transect was obtained from soil samples of 20 cm depth. Additionally, for each transect, plant diversity was also estimated using the Shannon-Wiener index and the aridity index (AI). Environmental gradients were integrated by altitude and the aridity index. The relationships between AGC and SC, and environmental gradients were evaluated with generalized linear models, using AGC and SC as dependent variables and altitude, the AI and the diversity index as independent variables. In addition, it was tested whether there is a significant relationship between AGC and SC. A positive relationship was found between the altitude, the aridity index and the both carbon stocks, AGC and SC. AGC in the study area range between 19.51-202.90 Mg C ha<sup>-1</sup>. SC ranged between 5.96 to 82.54 Mg C ha<sup>-1</sup>. The highest amount of carbon stored was found in the conifers, followed by oaks. Our results suggest that climate in the study area exerts an effect that causes differences in both carbon stocks; the highest and wettest conditions in the study area areas, the highest concentration of carbon, conversaly, the lowest and dryets conditions in the study areas, the lower concentrations of carbon. These results could have consequences in two senses. On the one hand, differences in environmental gradients should be considered when propose integrated forest management plans that promote the

growth of individuals in small diameter classes. On the other, drastic changes in the thermal and moisture regimes present in the area could strongly impact small individuals and affect future replacements of canopy individuals. My results also suggest that biomass estimates obtained for arboreal individuals, whose diameters are out of the range in which the used allometric model was constructed might not be not accurate. The results of SC can be related to the fact that the soils of the study area have many rocks in the process of weathering, which does not allow the accumulation of carbon in the soil.

## Introducción

El papel primordial de los bosques en la mitigación del cambio climático ha sido ampliamente reconocido por la comunidad internacional, debido a que juegan un papel relevante para mitigar el cambio climático, porque al incrementar la cantidad de C almacenado en la biomasa arbórea y en el suelo, es posible disminuir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmosfera (IPCC 2014). Desde el sector forestal, la deforestación y la degradación de los bosques juegan un papel fundamental en el cambio climático global (Khaine y Woo 2015) debido a que estos procesos impactan a los almacenes de carbono en bosques favoreciendo la emisión de GEI a la atmosfera.

La comunidad científica a nivel internacional busca proporcionar bases cuantitativas desde el sector forestal que permitan generar líneas de acción para contribuir en contra del cambio climático (FAO 2018). Para ejecutar estas líneas de acción, en primer lugar, es necesario conocer los almacenes de carbono que existen en los bosques y que factores los determinan, para posteriormente proponer estrategias enfocadas al incremento y conservación del carbono almacenado (Seppälä y Buck 2009).

El carbono almacenado en la biomasa arbórea y en los suelos puede representar el 86% del C total almacenado en los ecosistemas forestales (Pan et al. 2011). En México, el 70% de la superficie total del territorio está ocupada por algún tipo de vegetación, de este porcentaje, un 24% corresponde a bosques templados, un 21.7% a selvas y el resto a otros tipos de vegetación (SEMARNAT 2016). En los bosques templados del país las especies de pino y encino son elementos dominantes, por lo que su importancia ecológica y económica ha sido reconocida ampliamente (Rzedowski 2006; Galicia et al. 2016). La biomasa arbórea de estos bosques está constituida en un 50% por carbono (Chapin et al. 2011), el cual era carbono atmosférico que fue incorporado al tejido de las plantas mediante la fotosíntesis (Chapin et al. 2011).

Parte importante del carbono almacenado en el suelo se presenta en forma de materia orgánica. Esta última, es el resultado de la descomposición del mantillo, los residuos leñosos, entre otros. La cantidad de carbono en este almacén es mayor en comparación con los otros almacenes, encontrándose en el suelo alrededor del 44% del carbono total del

ecosistema (Pan et al. 2011). El carbono contenido en la materia orgánica del suelo representa entre un 45 a un 55% del almacenado en el suelo (Galicia et al. 2016).

De forma natural, la biomasa arbórea y los suelos de los bosques se encuentran bajo un equilibrio dinámico entre el carbono atmosférico incorporado fotosintéticamente a estos y las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera por respiración de las plantas y del suelo. Este equilibrio se encuentra condicionado por variables ambientales como la temperatura y la evapotranspiración del agua (Chapin et al. 2011).

## **Antecedentes**

### *Características generales de los bosques templados*

Alrededor del 25% de los bosques del mundo son templados (Tyrrell et al. 2012). En México, los bosques templados (BT) generalmente tienen una estacionalidad marcada, que alterna entre veranos húmedos y cálidos; con inviernos lo suficientemente tenues para mantener angiospermas de hoja ancha (Tyrrell et al. 2012). Los ecosistemas templados en el país pueden clasificarse en tres categorías principales según Rzedowski (2006): bosque de *Quercus* (encino), b) bosque de coníferas y c) bosque mesófilo de montaña. Por otro lado, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2014) considera nueve tipos diferentes de bosques templados: a) bosque de ayarín, b) bosque de cedro, c) bosque de oyamel, d) bosque de pino, e) bosque de pino-encino, f) bosque de táscate, g) bosque de encino, h) bosque de encino-pino y i) bosque mesófilo de montaña. La superficie cubierta por BT en el país es alrededor del 17% (Galicia et al. 2016). Estos bosques poseen cerca de 7,000 especies de plantas vasculares, las cuales representan aproximadamente el 25% de la flora fanerogámica del país (Rzedowski 1991), caracterizada por una alta diversidad de especies de pino y encino (Rzedowski 2006; Tyrrell et al. 2012).

En México, los BT crecen en altitudes que van desde los 1,200 hasta 2,800 msnm con lluvias que varían entre 600 y 1,200 mm anuales (Rzedowski 2006) y cuya variación local de precipitación depende de factores como la latitud, la topografía y la posición continental (Rzedowski 2006; Tyrrell et al. 2012). Los BT en México se establecen principalmente en 7 tipos de suelo diferentes de acuerdo a la clasificación de la FAO: a) leptosoles, b)

regosoles, c) luvisoles, d) phaeozems, e) cambisoles, f) umbrisoles y g) andosoles (en orden de mayor a menor cobertura); el 58.6% de los BT en México están sobre suelos de tipo leptosoles y regosoles, los cuales se caracterizan por su incipiente desarrollo pedogenético y por ser someros (Galicia et al. 2016).

### Características de los bosques de pino y encino en México

Los *Pinus* y *Quercus* se encuentran en condiciones ecológicas muy semejantes, por lo que frecuentemente las especies de ambos géneros se encuentran en simpatria (Rzedowski 2006). Los encinos y algunos pinos en México se encuentran en clima Cw de la clasificación de Köppen (1948), la cual corresponden a un clima templado donde la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C y la del mes más cálido es superior a 10 °C. Con una disminución considerable de las precipitaciones en el invierno (Rzedowski 2006). Los encinos y pinos habitan también en climas tipo Cf, Cs, Cx', Af, Am, Aw y BS. (Rzedowski 2006).

Los pinos son elementos dominantes o codominantes en muchos bosques de México. Los pinares, con frecuencia, se distribuyen en altitudes mayores, con respecto a los encinares (Rzedowski 2006). México es el segundo centro de diversidad del género *Pinus* en el mundo (Sánchez-Gonzales 2008; Gernandt y Pérez de la Rosa 2014) con 49 especies, lo que representa casi el 40% de la diversidad mundial (Sánchez-Gonzales 2008; Gernandt y Pérez de la Rosa 2014). La mayor diversidad de especie de pinos se encuentra en la Sierra Madre Occidental, la cual incluye al estado de Jalisco. En Jalisco, se han registrado especies de pinos endémicos como *P. georginae*, *P. jaliscana* y *P. luzmariae* (Sánchez-Gonzales 2008; Gernandt y Pérez de la Rosa 2014).

El 60% de especies de *Pinus* tiene importancia económica (Sánchez-González 2008), convirtiéndose en uno de los recursos naturales de mayor importancia para México, debido a que de ellos se obtiene madera para aserrar, pulpa para papel y cartón y, resina para elaboración de aguárras. A nivel local, los *Pinus* se aprovechan como leña y material para construcción de casas y muebles (Rzedowski 2006; Sánchez-Gonzales 2008).

Por su parte, el género *Quercus*, es el género de la familia Fagaceae con la distribución más amplia a nivel mundial. Se encuentra en casi todos los BT mexicanos, así como en algunas

regiones tropicales y subtropicales (Valencia 2004). México y el sureste de Asia son considerados como los dos centros de diversidad del género. La diversidad específica del género es difícil de precisar ya que oscila entre 300 a 600 especies en todo el mundo (Valencia 2004). México posee al menos 161 especies del género *Quercus*, lo que representa alrededor de una tercera parte (32.2 - 40.2%) de la diversidad específica mundial de este género, y un subconjunto de 109 especies son reportadas como endémicas al país (Valencia 2004). Las especies reportadas para México se clasifican en tres secciones principales: encinos dorados (*Protobalanus* con cuatro especies), rojos (*Lobatae* con 76 especies) y blancos (*Quercus* con 81 especies). Zavala (1998) menciona que los encinos rojos son más abundantes en regiones húmedas y que los blancos lo son en regiones secas. El estado de Jalisco ocupa el tercer lugar en riqueza de encinos con 45 especies, los cuales pertenecen a las secciones *Lobatae* y *Quercus*, solo superado por los estados de Oaxaca y Nuevo León (Valencia 2004).

En los BT, las especies de encino se ubican por lo regular a altitudes inferiores que las de pinos, pero en muchas regiones esta disposición no se cumple y a veces se encuentra invertida (Rzedowski 2006). Con frecuencia las especies de *Quercus* son elementos dominantes del dosel, que pueden alcanzar valores altos de importancia relativa en comparación con otras especies, esto ha sido documentado en los bosques de Mezquitic (Nieves-Hernández et al. 2009) y en la Sierra de Manantlán, Jalisco (Givnish 1998).

Las especies del género *Quercus* son muy importantes para la economía de las localidades rurales y periurbanas (Valencia 2004; Rzedowski 2006; Mendoza-Ponce y Galicia 2010; Camou-Guerrero et al. 2014). Localmente la madera de encino se emplea para construcciones, elaboración de muebles, postes, entre otros usos; pero más que nada como combustible, bien sea directamente como leña o bien transformada en carbón vegetal, cuyo uso tiene profundo arraigo y tradición entre las comunidades rurales y periurbanas de México (Rzedowski 2006), por lo que los encinos son un recurso económico primario para varias comunidades (Álvarez y Rubio 2016). Estudios realizados en Chiapas reportan que las comunidades tienen una preferencia por leña de encino, por lo que, las poblaciones de especies de este género han disminuido, lo que ha provocado una dominancia de los pinos en los bosques, proceso que puede repetirse en otras comunidades del país (Baroody 2013).

La preferencia por la leña de encino, también se ha reportado en la Cuenca del Lago de Cuitzeo (Camou-Guerrero et al. 2014), en donde la producción de carbón vegetal a base de leña de encinos predomina en comunidades rurales. No obstante que la producción de carbón vegetal implica el corte total de todos los individuos de encino, promoviendo cambios de uso de suelo a actividades agropecuarias, algunos de estos encinos tienen la capacidad de rebrote alcanzando DAP de hasta 15 cm, entre los 7 y 15 años posteriores al corte. El número máximo de ciclos de corte que los individuos de encino pueden alcanzar sin morir es de 7 ciclos (Camou-Guerrero et al. 2014).

Sin embargo, los bosques manejados de encino que se están recuperando, con individuos jóvenes, tienen una capacidad potencial como almacén de carbono, debido a que los individuos jóvenes, potencialmente, almacenarán mayor cantidad de biomasa y, por ende, de carbono a lo largo de su desarrollo hasta una etapa adulta (Rodríguez- Laguna et al. 2009).

### *Deforestación y emisiones de los bosques en México*

Las tasas de deforestación en México han disminuido en casi 43%, ya que pasaron de una tasa de 3,550 km<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> en el periodo de 1993 – 2002, a 1,550 km<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> para el periodo 2002 – 2007 (SEMARNAT 2010). Además, la emisión de GEI generados por cambios de uso de suelo y degradación de bosques disminuyó un 64% para el año 2010 con respecto a 1990 (SEMARNAT 2012). En 2010, la conversión de bosques a pastizales emitía el 9.2% de las emisiones nacionales, con respecto al total 493,450 Gg de CO<sub>2e</sub> año<sup>-1</sup> (SEMARNAT 2012). Los BT en México, sostienen el 76% de la producción de leña (Álvarez y Rubio 2016), lo que provoca una fuerte presión antrópica sobre los recursos forestales del país, incentivando en algunos casos a la deforestación. Históricamente, los encinares han sido explotados para obtener madera y carbón vegetal, además, este tipo de bosques han cambiado de uso de suelo principalmente para la agricultura y el desarrollo económico de las comunidades (Tyrrell et al. 2012). El extenso aprovechamiento forestal en los BT, la tala ilegal, la deforestación y en algunos casos los incendios forestales, han provocado que 20 de las especies de *Pinus* se encuentren en alguna categoría de riesgo según la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (Sánchez-Gonzales 2008; Gernandt y Pérez de la Rosa 2014).

Con base en los datos anteriores de deforestación y emisión de GEI, México ha impulsado su estrategia nacional para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la deforestación y degradación de los bosques (REDD+ 2017-2030), la conservación, el manejo sustentable de los bosques y el incremento de los almacenes de carbono. La estrategia REDD+ tiene como objetivo el impulsar los proyectos forestales y cumplir con los acuerdos internacionales de México en materia de cambio climático (CONAFOR 2017).

### *Almacenes de carbono y los factores que los controlan*

Los almacenes de carbono en biomasa se forman por la asimilación de CO<sub>2</sub> atmosférico por parte de los ecosistemas terrestres mediante el proceso de fotosíntesis de los organismos autótrofos (plantas y bacterias), para conservarlos a largo plazo en sumideros como son el suelo y la biomasa arbórea (Kanninen 2003; Yañes 2004; IPCC 2014). La estimación del almacén de carbono atmosférico capturado por los ecosistemas terrestres ha permitido inferir una relación estequiométrica de 1:3, lo cual significa que por cada Kg de carbono acumulado en biomasa arbórea se capturan alrededor de 3kg de CO<sub>2</sub> atmosférico (Gómez y Pérez 2015).

Los almacenes de carbono en los bosques dependen de un proceso balanceado entre la producción primaria neta del ecosistema, que representan una ganancia de carbono, y la respiración del ecosistema, además, de las actividades de organismos descomponedores como los hongos y las bacterias, lo cual representan una emisión de carbono desde el suelo de los bosques a la atmosfera (Heimann y Reichstein 2008, Guerrero-Ortiz et al. 2012).

Los factores que determinan los almacenes de carbono tienen una variación muy amplia debido a diferentes elementos, tanto como biofísicos, como antrópicos. Entre los biofísicos, los factores climáticos, como la precipitación y temperatura, guardan una estrecha relación con carbono almacenado en biomasa arbórea (Heimann y Reichstein 2008). Por ejemplo, se ha identificado un aumento en la biomasa conforme se incrementa la precipitación, a tal grado que se puede decir que la precipitación afecta positivamente a la generación de biomasa (Campo et al. 2016). Por otro lado, se ha reportado que, en bosques templados del hemisferio norte, la sequía provoca un aumento en la mortalidad de los árboles (Jump et al. 2009; Pan et al. 2011) además, de ocasionar que las plantas cierren sus estomas

ocasionando una disminución de la actividad fotosintética y, por ende, la disminución de carbono almacenado (Chapin et al. 2011).

Por su parte, la temperatura también tiene una estrecha relación con la precipitación y el carbono en biomasa arbórea; ya que un aumento de ésta provocaría un incremento en la evapotranspiración, por lo que tenderían a tener balances hídricos negativos conforme la temperatura se eleva, esto sugiere que las altas temperaturas provocarían que los almacenes de carbono en biomasa arbórea fueran menores (Heimann y Reichstein 2008). Autores como Magnani et al. (2007) encontraron que la temperatura se encuentra positivamente correlacionada con la fotosíntesis y la respiración del ecosistema. Por estas razones, las altas temperaturas provocan una disminución en la actividad fotosintética de las plantas (Chapin et al. 2011), ocasionando una disminución en la asimilación de carbono por parte de éstas.

Pan et al. (2011) y Kanninen (2003) reconocen que los bosques templados pueden tener mayor cantidad de biomasa si se emplean una estrategia de manejo que considere una perspectiva integral acerca del almacén de carbono; estas estrategias incluyen un manejo forestal adecuado con bajas tasas de cosecha de individuos arbóreos, la conversión de tierras agrícolas abandonadas a tierras de recuperación forestal, así como el impulsar grandes esfuerzos para la reforestación y aforestación en los bosques.

Otro factor importante que altera la cantidad de carbono en la biomasa son los incendios forestales, ya sean naturales o provocados (Pan et al. 2011; Khaine y Woo 2015) y las plagas de insectos (como los escarabajos descortezadores) (Pan et al. 2011). Debido a que, al quemarse, morir y descomponerse los árboles, estos liberan CO<sub>2</sub> que vuelve a reincorporarse en la atmosfera.

### *Carbono en biomasa arbórea en BT de México*

Se estima que los bosques templados, por su extensión en el planeta almacenan alrededor del 11% del carbono global (Tyrrell et al. 2012). En México, se han realizado diversos estudios para cuantificar los almacenes de carbono en biomasa arbórea en los BT (Cuadro 1). Los estudios reportados en la Cuadro 1, presentan intervalos de almacenes de carbono

en biomasa arbórea, que van de los 35 Mg C ha<sup>-1</sup> en Cofre de Perote, Veracruz hasta los 347 Mg C ha<sup>-1</sup> en Ixtlán de Juárez, Oaxaca:

**Cuadro 1.** Valores de contenido carbono en biomasa arbórea reportados en distintos estudios realizados en bosques templados de México.

Vegetación Reportada	Estado de conservación	Cantidad de C en biomasa (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Sitio	Cita
BT	Perturbado	52	Mariposa Monarca, Michoacán	(Pérez-Ramírez 2009)
BT	Conservado	46 - 58	Reserva de Biosfera la Primavera, Jalisco	(Balderas y Lovett 2016)
BT	Aprovechado	72	Texcoco, Estado de México	(Bolaños-Gonzales et al. 2015)
BT	Conservado	110	Reserva de la Biosfera el Cielo Tamaulipas	(Rodríguez-Laguna et al. 2009)
BP	Conservado	71 - 123	Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México	(Franco 2005)
BT	Perturbado	48 - 128	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BT	ND	77 - 168	Altos de Chiapas	(de Jong et al. 1999)
BT	Aprovechado	172	Mariposa Monarca, Michoacán	(Pérez-Ramírez 2009)
BE	Conservado	90 - 173	Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México	(Franco 2005)

BT	Aprovechado	35 - 177	Cofre de Perote, Veracruz	(Mendoza – Ponce y Galicia 2010)
BE	Conservado	76 - 181	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BT	Conservado	81- 196	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al, 2008)
BT	Aprovechado	236	Sierra Juárez, Oaxaca	(Alvares y Rubio 2016)
BP	ND	79 - 244	Altos de Chiapas	(de Jong et al. 1999)
BP	Conservado	48 – 257	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BT	Conservado	265	Mariposa Monarca, Michoacán	(Pérez-Ramírez 2009)
EBM	ND	108 - 302	Altos de Chiapas	(de Jong et al. 1999)
BT	Aprovechado	225 - 347	Ixtlán de Juárez, Oaxaca	(Galicia et al. 2015)
BT	ND	181	Promedio para la República Mexicana	(Khaine y Woo 2015)
BT	ND	72-235	Promedio para la República Mexicana en sitios secos	(Tyrrell et al. 2012)

BE=Encinares; BP= Bosque de pino; BT=Bosque templado; EBM=Encinares y bosque mesófilo de montaña; ND= No Disponible. El estado de conservación se refiere a si en el estudio el sitio de estudio es reportado como conservado o aprovechado, el cual fue definido por cada autor.

### Carbono en suelos en BT de México

Se ha encontrado que el carbono almacenado en los suelos representa un balance dinámico entre la producción primaria neta del ecosistema, la descomposición de la materia orgánica (MO) y la respiración total del suelo (esta respiración agrupa a la realizada por la comunidad microbiana, raíces y por la mineralización del carbono) (Robert 2002; Chapin et al. 2011; Guerrero-Ortiz et al. 2012; Price et al. 2012). Del proceso de descomposición de la MO a la atmosfera se libera una fracción de carbono en forma de CO<sub>2</sub> por respiración, principalmente realizado por la comunidad microbiana, otra parte del carbono liberado por la descomposición se convierte en compuesto más sencillos, y otro más es almacenado como biomasa por la comunidad microbiana (Guerrero-Ortiz et al. 2012).

Se han identificado 4 factores que actúa sobre el balance de carbono en el suelo, la vegetación, el clima (en particular la precipitación y la temperatura) y las propiedades del suelo (Robert 2002; Price et al. 2012), además de la comunidad microbiana (Chapin et al. 2011). A continuación, se explica con mayor detalle cómo afectan estos factores los almacenes de carbono en los suelos:

a) Vegetación: El 75% del carbono orgánico en el suelo es MO muerta (Chapin et al. 2011). Este carbono orgánico proviene de la descomposición de la MO que conforma el mantillo y la materia de las raíces finas muertas. Éstos poseen diferentes cantidades de C (soluble o recalcitrante) dependiendo del tipo de vegetación que se trate (Chapin et al. 2011; Orellana-Rivadeneira et al. 2012; Price et al. 2012). La calidad de la MO depende de las proporciones de carbono soluble o recalcitrante que posea la vegetación (Guerrero-Ortiz et al. 2012).

b) Factores climáticos: Se ha descubierto que la descomposición de la MO aumenta conforme se incrementa la humedad y la temperatura (Davidson y Janssens 2006; Chapin et al. 2011; Orellana-Rivadeneira et al. 2012; Saynes 2012). Además, la respiración microbiana aumenta conforme la humedad, la temperatura y la descomposición de la MO se incrementan (Davidson y Janssens 2006; Chapin et al. 2011).

c) Comunidad microbiana. La comunidad microbiana representa alrededor del 2% del carbono total del suelo (Chapin et al. 2011). La actividad microbiana del suelo es muy

importante para la descomposición de la MO, debido a que esta comunidad influye en los tipos y en la tasa de producción de enzimas. Las enzimas son especialmente útiles en la degradación de compuestos como los azúcares, proteínas, lignina, celulosa y hemicelulosa contenidas en la MO (Chapin et al. 2011).

En México, pocos estudios se han efectuado para evaluar el papel de los diferentes tipos de suelo como reservorio terrestre de carbono en los BT (Galicia et al. 2016), existen 20 artículos publicados en revistas indexadas a nivel internacional que reportan el carbono almacenado en el suelo forestal, esto se puede explicar por la dificultad en el muestreo de carbono en suelos y porque se les ha dado prioridad a los almacenes de carbono en la biomasa por encima del suelo (Galicia et al. 2016). Datos publicados en estudios relacionados con el almacén de carbono en suelos en los BT, indican que éstos, así como las selvas lluviosas, son los ecosistemas que almacenan más carbono en México (Guevara et al. 2016). En México, los estudios realizados para cuantificar el almacén de carbono en suelos para BT han reportado valores que van desde 2.7 Mg C ha<sup>-1</sup> en la Región Purépecha de Michoacán hasta 146 Mg C ha<sup>-1</sup> en la Sierra de Manantlán en Jalisco en los primeros 20 cm de profundidad en suelo (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Valores de carbono en suelos reportados en distintos estudios para los bosques templados de México.

Vegetación Reportada	Estado de Conservación	Cantidad de C en el suelo (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Profundidad del suelo (cm)	Ubicación	Cita
BT	Perturbado	11.0 - 40.3	5 - 15 cm	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BE	Conservado	9.8 - 43.5	5 - 15 cm	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BP	Conservado	2.7 - 49.0	5 - 15 cm	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)

BT	Conservado	9.4 - 60.3	5 -15 cm	Región Purépecha, Michoacán	(Ordóñez et al. 2008)
BT	ND	52 – 76	10 cm	Perote, Veracruz	(Saynes 2012)
BT	ND	66 - 85	15 cm	Hidalgo	(Saynes 2012)
BT	Aprovechado	35 - 116	10 cm	Ixtlán de Juárez, Oaxaca	(Saynes 2012)
BT	ND	133	10 cm	Oaxaca	(Saynes 2012)
BT	ND	146	20 cm	Sierra de Manantlán en Jalisco	(Saynes 2012)

---

BE=Encinares; BP= Bosque de pino; BT=Bosque templado; ND= No Disponible.

### Modelos alométricos para la estimación de biomasa arbórea

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar volumen y biomasa, en este caso de árboles por medio de pocas variables de fácil medición como son el diámetro a la altura del pecho y/o la altura total del árbol y la densidad de la madera, siempre y cuando estos datos se encuentren disponibles o no representen un esfuerzo de muestreo muy grande en campo (Chave et al. 2014; Segura y Andrade 2008).

Los modelos alométricos son la principal herramienta para estimar volúmenes de biomasa a partir de inventarios forestales (Rojas-García et al. 2015). Con los modelos alométricos es posible realizar estimaciones de carbono en biomasa arbórea con cierto grado de incertidumbre, las cuales son importantes para evaluar el potencial de los diferentes ecosistemas como almacenes de carbono.

La precisión de las estimaciones indirectas para estimación de biomasa depende directamente de la disponibilidad de modelos alométricos confiables y la exactitud de los datos recolectados en campo (Chave et al. 2014). Se ha identificado que la densidad de la madera y el área basal son variables notables en la predicción del volumen de biomasa arbórea en un sitio (Balderas y Lovett 2013; Chave et al. 2014).

A nivel mundial, los modelos alométricos son ampliamente usados como estimadores de biomasa aérea. En México, se cuenta con ecuaciones para especies forestales en 26 de los 32 estados del país (Rojas- García et al. 2015). El estado de Jalisco cuenta con aproximadamente 20 ecuaciones alométricas publicadas para bosque tropical deciduo, pero ninguna para bosques templados (Rojas- García et al. 2015).

Los modelos alométricos generados en México abarcan diversos tipos de vegetación, el bosque de pino-encino es el ecosistema que tiene el mayor número de ecuaciones obtenidas para sus especies (78 ecuaciones), seguido por el bosque de pino (73 ecuaciones) y el bosque mesófilo de montaña (32 ecuaciones), mientras que los bosques de encinos son el tipo de vegetación con el menor número de ecuaciones reportadas (6 ecuaciones) (Rojas- García et al. 2015). En México, las familias de plantas que cuentan con el mayor número de ecuaciones alométricas, en orden de importancia, son: Pinaceae (123 ecuaciones), Fabaceae (73ecuaciones) y Fagaceae (50 ecuaciones) (Rojas- García et al. 2015).

El método más preciso para estimar biomasa arbórea es el método destructivo, en el cual los individuos arbóreos son cosechados, para después cortarlos y pesarlos en partes, posteriormente, se generan modelos alométricos que permiten identificar una relación entre la biomasa pesada y diversas variables dasométricas. Estas ecuaciones alométricas son utilizadas a menudo como base para otros métodos indirectos como los sensores remotos (Rojas-García et al. 2015), el cual es un método de menor impacto que el método destructivo.

### *Efectos de los gradientes ambientales en los patrones de distribución de la biomasa*

Mediante el uso de gradientes ambientales se ha encontrado que los bosques son sensibles a cambios bruscos en las condiciones de temperatura y precipitación. Por ejemplo, en bosques templados del occidente de Estados Unidos, se ha observado que al disminuir la precipitación y aumentar la temperatura, los bosques entran en un estado de estrés por sequía que provoca que las masas forestales aumenten su tasa de mortalidad; estos efectos disminuyen los almacenes de carbono (Jump et al. 2009).

El empleo de los gradientes ambientales permite observar la distribución espacial que tiene la biomasa en función de los cambios a lo largo de dichos gradientes. En Brasil, se encontró

que la mayor concentración de biomasa en bosques tropicales se encuentra en sitios donde hay un aumento en la altitud y en la inclinación de la pendiente, esto se puede explicar debido al efecto del suelo (textura y drenaje), el manejo humano y a la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Alves et al. 2010). Culmsee et al. (2010) encontraron resultados similares a los de Alves et al. (2010) en el Sudeste Asiático. Los autores mencionan que en bosques con dominancia de *Lithocarpus* sp. la biomasa se incrementa en zonas de alta y baja montañas, disminuyendo en zonas con altitudes intermedias. En este estudio, el patrón de distribución de la biomasa se puede explicar por cambios en la estructura del bosque y composición de las especies. De manera adicional, se identificó que, la densidad de la madera aumenta con la altitud; lo cual estuvo asociado a su vez con el incremento en la dominancia de individuos arbóreos de la familia Fagaceae. Así mismo, se encontró que hay un incremento en los diámetros de los tallos de los árboles acompañado con una disminución de sus alturas, ambas características relacionadas con un mayor crecimiento en biomasa por debajo del suelo.

En este mismo sentido, se sabe que el aumento de la elevación puede incrementar las tasas de crecimiento de los árboles, la estructura de soporte y el área basal debido a la reducción de las temperaturas y de las condiciones del suelo (Givnish 1998; Körner 2007; Culmsee et al. 2010; Unger y Leuschner 2012). Sin embargo, no es una tendencia general de todos los sitios. La productividad primaria neta del bosque está influenciada por las diferencias en la pendiente, aspecto, textura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el pH, la profundidad hasta la roca madre, la altitud, la precipitación y la temperatura (Chapin et al. 2011; Reich 2011).

### *Patrones de diversidad vegetal en función de la altitud*

La diversidad vegetal puede ser afectada por la altitud. En la Sierra de Manantlán en Jalisco, Givnish (1998) estudio la composición, estructura y diversidad forestal, identificando dos aspectos relevantes: a) la estructura forestal de los bosques varía continuamente con la altitud, particularmente el área basal es menor en los sitios bajos con mayor influencia antrópica y b) la diversidad de especies de plantas disminuye bruscamente con el aumento en la altitud. En otros estudios como el realizado en Veracruz por Toledo y Williams (2014), se reporta que a lo largo de un gradiente altitudinal la riqueza de especies

disminuía conforme la altitud aumenta; un patrón semejante fue reportado por Salas-Morales y Meave (2012) para la Sierra Madre del Sur en Oaxaca y por Sánchez-Gonzales y López-Mata (2005) para el Cerro Tláloc en la Sierra Nevada, en el centro de México. Por estas razones, resulta interesante analizar si la diversidad de especies influye en los almacenes de carbono, bajo el supuesto de que, en un área de alta diversidad de especies, existiría una mayor cantidad de carbono almacenado.

## **Justificación**

A nivel mundial, se ha otorgado a los bosques un papel destacado en la política de cambio climático, principalmente porque si aumenta el almacén de carbono en los bosques se reducirán los impactos negativos del CC. Sin embargo, estimar la cantidad de carbono en el bosque es un requisito previo para poder plantear medidas que contribuyan al incremento del almacén de C.

La presente tesis pretende generar una estimación de los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelo a lo largo de un gradiente ambiental. Además, se analiza de manera detallada la contribución que tienen los elementos arbóreos dominantes de los bosques templados, en particular las coníferas y los encinos (el presente trabajo considera como coníferas a los pinos y los *Abies*). Los resultados obtenidos pueden servir para resaltar la importancia de conservar e incrementar los almacenes de carbono en los bosques templados de México y en particular a las Serranías Occidentales de Jalisco. Se considera que este estudio es un insumo de información que, a mediano y largo plazo, pueda ser utilizado en la generación de estrategias de mitigación el cambio climático a diferentes escalas.

## **Preguntas de investigación**

¿Cuánto carbono está almacenado en la biomasa arbórea y en el suelo de los bosques pertenecientes a las Serranías Occidentales de Jalisco, México y cómo se ve afectado por los gradientes ambientales (altitud, aridez y diversidad vegetal)?

¿Existe una relación entre el almacén de carbono en biomasa arbórea y el almacén de carbono en suelo a lo largo de los gradientes ambientales?

¿Cuánto carbono almacenan las especies de coníferas y encinos en las Serranías Occidentales de Jalisco, México?

### Hipótesis nula

- Los gradientes ambientales y sus respectivos factores (altitud, aridez y diversidad vegetal, entre otros) no son determinantes de los almacenes de carbono en la biomasa arbórea y suelos de los bosques templados; por lo que, cambios (aumento o disminución) de estos factores ambientales no los afectará.
- No existe una relación directa entre los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelo.
- En términos relativos, las coníferas y las especies de encinos contribuyen de igual manera en el carbono almacenado.

### Hipótesis de trabajo

- Sí existen cambios en los almacenes de carbono en biomasa arbórea y suelos a lo largo de los gradientes ambientales, éstos son factores que determinan la estructura de los bosques y los procesos asociados al almacén de carbono. Los almacenes de mayor cantidad de carbono se encuentran a mayores altitudes y en zonas de mayor humedad.
- Existe una relación directa entre los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelo debido, a que, estos almacenes se encuentran en constante equilibrio entre la ganancia por producción primaria neta del ecosistema y la pérdida por respiración, degradación y descomposición.
- La contribución de carbono de las coníferas y de las especies de encino es diferente, siendo más importantes la contribución de las coníferas debido a su dominancia y a sus respectivas dimensiones que llegan a alcanzar. La sección *Lobatae* del género *Quercus* almacena mayor carbono que la sección *Quercus* del mismo género, debido a que son más dominantes que la sección *Quercus*.

## Objetivos

### Objetivo general:

Analizar el carbono almacenado en la biomasa arbórea aérea y suelo de los bosques pertenecientes a las Serranías Occidentales de Jalisco, México, evaluando si existe una relación entre ambos almacenes y los gradientes ambientales.

### Objetivos particulares:

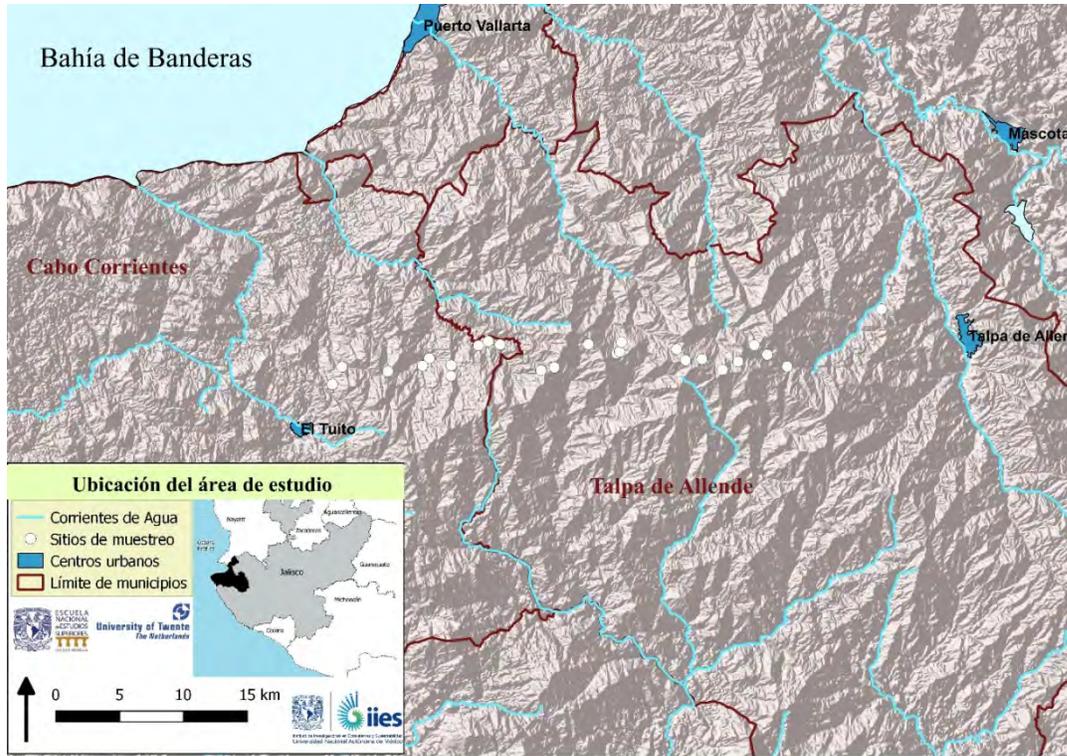
- Estimar los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelos de los bosques.
- Evaluar si los cambios en los almacenes de carbono en biomasa arbórea y carbono total en suelos son afectados por cambios asociados a gradientes ambientales (altitud, aridez y diversidad vegetal).
- Evaluar si existe una relación entre los almacenes de carbono en biomasa arbórea y en suelos.
- Evaluar la contribución relativa de las coníferas (*Pinus* y *Abies*) y encinos (*Quercus*), y de sus dos secciones (encinos rojos -*Lobatae*- y blancos -*Quercus*-), en los almacenes de carbono en biomasa arbórea en el área de estudio.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estado de Jalisco está localizado en el oeste de México y comprende el 4% de la superficie del territorio nacional (INEGI 2005). En Jalisco convergen cuatro grandes provincias fisiográficas (el Sistema Neovolcánico Transversal, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Occidental y la Meseta Central) (INEGI 2001; Reich 2008). En estas regiones fisiográficas se encuentran las cuencas hidrográficas Lerma-Santiago, Río Huicicila, Río Ameca, Costa de Jalisco, Armería-Coahuayana, Balsas y el Salado que drenan al Océano Pacífico (INEGI 2001). El presente estudio se realizó en las Serranías Occidentales de Jalisco, que incluyen las sierras conocidas como Sierra del Tuito – Cuale–Talpa de Allende, ubicadas dentro de la región de Bahía de Banderas (Figura 1). Estas Serranías forman parte

de una subregión localizada entre la Sierra Madre del Sur y el Sistema Neovolcánico Transversal (Cuevas et al. 2010) y de la cuenca hidrográfica Costa de Jalisco (Reich et al. 2008; Reich et al. 2011).



**Figura 1.** Localización del área de estudio. Elaboró M en C Miguel Ángel Salinas Melgoza con datos de (INEGI 2016).

En la zona de estudio se encuentran tres tipos de climas. En las altitudes bajas, según la clasificación de Köppen modificada por García (1998), el clima es Aw<sub>2</sub> (w)i, el cual corresponde a un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Velázquez et al. 2012). La temperatura media anual en este tipo de clima es mayor a 22° C y en el mes más frío es mayor a 18°. Este clima es el más húmedo de la región de Bahía de Banderas, ya que recibe diez veces más lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco. El porcentaje de lluvia invernal en este tipo de clima es menor a 5%. Las zonas que tienen este clima presentan un cociente entre precipitación y temperatura mayor a 55.3 mm/°C y con una oscilación térmica que varía entre 5 y 7° C (Velázquez et al. 2012). Hacia las zonas de mayor altitud se pueden encontrar dos tipos de clima, el A(C) w<sub>2</sub> (semicálido subhúmedo) y

Cw<sub>2</sub> (clima templado subhúmedo) (García 1998). El primero se caracteriza por una temperatura media anual de 18° C, siendo en el mes más frío menor a 18° C y en el más cálido mayor a 22° C y con lluvias en verano. El Cw<sub>2</sub> se caracteriza por una temperatura media anual de entre 12 y 18° C, con temperaturas del mes más frío entre -3 y 18° C y el más cálido por debajo de los 22° C y con lluvias en verano (García 1998). La variación climática en la región está influenciada por una interacción entre los vientos del oeste de las masas de aire marítimo y los efectos de las cordilleras de la Sierra Madre del Sur y el Sistema Neovolcánico Transversal (Reich et al. 2008).

Se han definido tres regiones ecológicas en las Serranías Occidentales de Jalisco, con base en sus condiciones climáticas y los elementos que componen sus floras: la primera es la zona tropical subhúmeda en las elevaciones más bajas, seguida de la zona tropical seca en las elevaciones intermedias y, en las elevaciones más altas, la zona templada subhúmeda dominada por los bosques de pino-encino. Los bosques de pino-encino constituyen una comunidad muy diversa con un elemento endémico muy importante que incluye plantas, mamíferos, reptiles y anfibios (Reich et al. 2008; Reich et al. 2011).

La zona de estudio presenta una abrupta transición biogeográfica que ha promovido altas tasas de endemismo en muchos grupos de plantas (Cuevas et al. 2010). En las elevaciones más altas, los bosques tropicales secos cambian gradualmente a bosques de pino-encino, los cuales son reconocidos como centro de diversificación del género *Quercus* (Nixon 1993) y, en particular, para los encinos rojos (sección *Lobatae*) en México (Torres-Miranda et al. 2011). En el estado de Jalisco, destacan la presencia de especies endémicas como el pino de Jalisco, (*Pinus jaliscana*), la laurácea *Beilschmiedia manantlanensis*, el álamo *Populus guzmanantlensis* y algunos encinos como *Q. cualensis*, *Q. iltisii* y *Q. tuitensis*, entre otros (Cuevas et al. 2010).

El estudio se desarrolló a lo largo de un gradiente altitudinal que oscila entre los 800 y los 2500 msnm en un eje este-oeste (Figura 2), comprendiendo gran parte de las tres regiones ecológicas de estas Serranías. En este gradiente se definieron seis tipos de vegetación principales considerando una modificación de la propuesta de Jardel (2015): bosque de *Quercus* y *Pinus* (BQP); bosque tropical deciduo con presencia de *Pinus* y *Quercus* (BTPQ) y de géneros como *Acacia*, *Conostegia*, *Ficus*, etc.; bosque de *Quercus* (BQ);

bosque mesófilo de montaña (*BMM*) donde están presentes géneros como *Carpinus*, *Cornus*, *Magnolia*, *Ternstroemia*, etc.; bosque de *Pinus*, *Abies* y *Quercus* (*BPAQ*); bosque de *Pinus* y *Quercus* (*BPQ*). Estos bosques han sido extensamente explotados por manejo forestal (Reich et al. 2008). En estos bosques se han reportado valores medios de área basal de  $69.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Reich y Aguirre 2009).



**Figura 2.** Perfil altitudinal y topográfico de la zona de estudio. Obtenido en Google Earth.

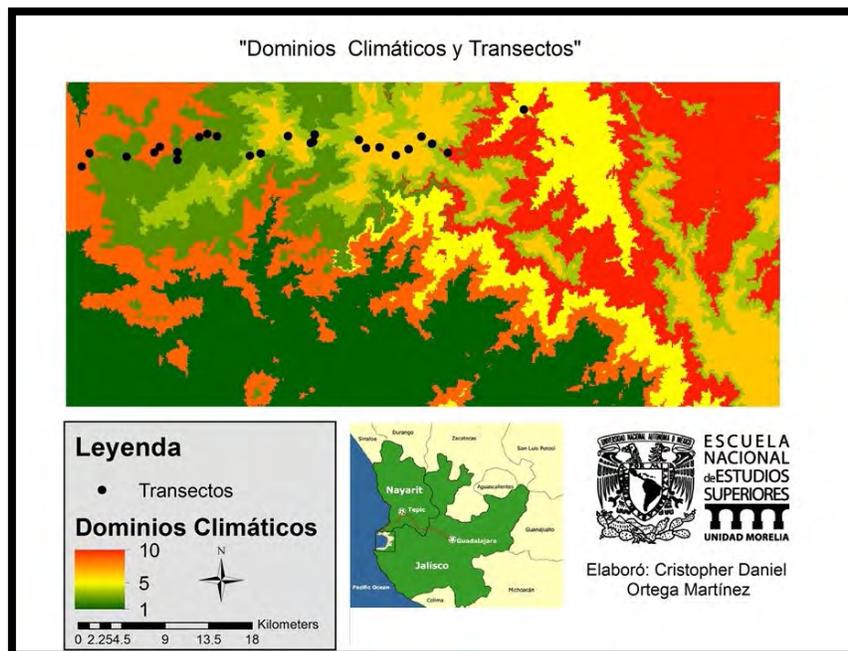
En el área de estudio se encuentran dos grupos de suelo: regosol eútrico (suelo rico en nutrientes) y regosol dístrico (suelo pobre en nutrientes), ambos de textura variable (INEGI 2007). Los regosoles son suelos minerales escasamente desarrollados en materiales no consolidados, por lo mismo tienen bajos contenidos de arcilla, baja capacidad de retención de humedad, baja capacidad de intercambio catiónico y también bajos contenidos de materia orgánica. En este tipo de suelo predominan las comunidades vegetales donde los pinos son el género dominante (Siebe et al. 2003; Galicia et al. 2016). La constitución geológica de esta zona es de granito y roca ígnea extrusiva; con afloramientos de material metamórfico (INECC 2017).

### Muestras de vegetación

Los datos de muestreos de vegetación usados en la presente tesis son parte del proyecto PAPIIT IV201015 y del proyecto de tesis de doctorado de la M en C Maribel Arenas Navarro perteneciente al posgrado en ciencias biológicas de la UNAM.

Los muestreos de vegetación fueron definidos a partir del uso de unidades geográficas con climas similares denominadas dominios ambientales, utilizando las 19 variables climáticas de Cuervo-Robayo et al. (2013) y tres variables topográficas: orientación, pendiente y

altitud. Para calcular la distancia entre los valores de cada variable ambiental en las celdas y determinar los dominios ambientales, se usó la métrica de Gower (1971) y se elaboró una matriz de similitud que ayuda a separar los grupos. Debido a la cantidad de datos que requirió este análisis, se utilizó el programa PATN ver. 3.01, para realizar una clasificación no jerárquica. Este programa permite distinguir el grupo al que fueron asignadas las celdas y así conocer el dominio al que pertenecen, identificando además los valores mínimos, máximos y promedios de los parámetros de cada dominio. Para la clasificación final se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico (UPGMA) basado en la semejanza de cada uno de los dominios. El archivo obtenido fue transformado a formato raster para visualizar los dominios en QGIS versión 2.14.2-Essen (QGIS Development Team 2016). Se utilizó un agrupamiento de 10 dominios (Arenas-Navarro et al. en preparación) en el área de estudio para seleccionar 25 sitios de muestreo que asegurarán la representación de todas las especies de encinos en cada dominio climático. Debido a la accidentada topografía de la zona y a la inaccesibilidad del terreno, la ubicación de algunos sitios fue modificada (Figura 3). En la Cuadro 3 se especifica la altitud de cada sitio de muestreo.



**Figura 3.** Dominios climáticos y ubicación de los 25 transectos en la zona de estudio. Datos de Arenas-Navarro et al. (En preparación).

Los muestreos de vegetación fueron realizados en cada uno de los 25 sitios seleccionados, los cuales tuvieron asociado una coordenada de geolocalización y el tipo de vegetación correspondiente. En cada sitio se estableció un transecto de 20 x 50 m (1000 m<sup>2</sup>), en el que se registraron todos los individuos enraizados dentro del transecto con una circunferencia a la altura del pecho mayor a 10 cm, la cual se midió con una cinta métrica y que posteriormente se transformó en diámetro a la altura del pecho (DAP). Para el caso de individuos que presentaron múltiples tallos y que cumplían con el criterio de circunferencia mínima, se registraron cada uno de los tallos sin sumarlos.

**Cuadro 3.** Ubicación de los transectos en el gradiente altitudinal.

Transecto	Altitud (msnm)	Transecto	Altitud (msnm)
T01	952	T14	1848
T02	999	T15	1767
T03	1869	T16	1637
T04	1820	T17	1570
T05	1153	T18	1868
T06	1020	T19	2200
T07	990	T20	2416
T08	1078	T21	2507
T09	1215	T22	2439
T10	892	T23	2060
T11	905	T24	2321
T12	897	T25	1208
T13	2051		

Posteriormente, en la captura de los datos de muestreo de vegetación en cada transecto se incluyeron los siguientes datos: 1) tipo de vegetación, 2) familia de las especies arbóreas registradas, 3) la sección a la que pertenecen las diferentes especies de encinos.

### Estructura diamétrica del bosque

Se describió la estructura diamétrica de los bosques para determinar el almacén de carbono para la zona de estudio, para ello se obtuvieron medidas de tendencia central y dispersión de los datos. La estructura diamétrica de los bosques fue categorizada con base en los siguientes criterios: 1) todas las especies presentes en el área de estudio, 2) las especies presentes por cada tipo de vegetación, 3) las especies que componen las familias de plantas más abundantes, 4) por cada especie de la familia Fagaceae y las coníferas, y 5) por cada especie que integra las dos principales secciones del género *Quercus* (encinos rojos y blancos), porque este género se encuentra ampliamente distribuido en el área de estudio. Se definieron 5 clases diamétricas con respecto al DAP: clase 1 (0-20 cm), clase 2 (20-40 cm), clase 3 (40-60 cm), clase 4 (60-80 cm) y la clase 5 (80-100 cm).

### Índice de diversidad de Shannon-Wiener

El índice de diversidad de Shannon-Wiener (1949) es una medida no paramétrica, que evalúa la diversidad alfa (Molina y Farinós 2012). Esta se fundamenta en que la diversidad o información de un sistema natural puede medirse de manera similar a la contenida en un código o un mensaje (Magurran 2004). Este índice considera a todas las especies como iguales y supone que los individuos de una comunidad son muestreados aleatoriamente y están representados en la muestra. No obstante, es una medida muy sensible al tamaño de la muestra, debido a que pueden surgir errores si la muestra no incluye todas las especies de la comunidad. Como la verdadera riqueza de especies de una comunidad es usualmente desconocida en su totalidad, no es posible que exista un estimador imparcial del índice de Shannon-Wiener (Magurran 2004). El índice se calcula de la siguiente manera:

$$H' = - \sum p_i \ln (p_i)$$

Dónde:  $p_i$  = proporción de individuos de la misma especie.

Este índice alcanza valores del 0 a 5, donde se puede atribuir rangos en los cuales del 0 a 1.5 son sitios con baja diversidad, de 1.5 a 3.5 son sitios de mediana diversidad y de 3.5 a 5 son sitios de alta diversidad (Magurran 2004). El índice de diversidad de Shannon-Wiener

(1940) fue obtenido para cada uno de los 25 transectos de muestro usando el programa BioDiversity Pro (McAlece et al.1997).

### Estimación de carbono en biomasa arbórea

Para el cálculo de biomasa arbórea se usaron diferentes fórmulas alométricas que emplean como único parámetro el DAP (Cuadro 4), definiendo dos grupos de fórmulas alométricas, que se diferencian únicamente en la estimación para las especies de encinos. Debido a que no se cuenta con fórmulas alométricas para encinos generadas en el estado de Jalisco, se utilizaron dos fórmulas generales publicadas, las cuales fueron generadas para encinos de sitios cercanos al estado de Jalisco. La primera ecuación es la propuesta por Navar (2009), quien trabajó con DAP entre 7.3 – 62.4 cm para especies del estado de Durango; la segunda ecuación utilizada es la de Aguilar et al. (2012), quien trabajó con DAP entre 3.8 – 26.6 cm, para especies del estado de Michoacán. En el caso de las coníferas, se utilizó la fórmula de Navar (2009) que obtuvo al trabajar con árboles cuyo DAP eran de 5.7 – 57.4 cm en el estado de Durango. Para el resto de las especies arbóreas, se empleó la ecuación que Penman et al. (2003) obtuvieron al trabajar con DAP entre 1.3 – 82.2 cm. De esta manera, el grupo uno (G1) incluye a las fórmulas de Nívar (2009) y Penman et al. (2003), el grupo 2 (G2) incluye Nívar (2009), Aguilar et al. (2012), Penman et al. (2003). Los valores de biomasa obtenidos con todas las fórmulas anteriores fueron multiplicados por 0.5 para obtener la estimación de carbono, de acuerdo con lo sugerido por el IPCC (1994).

Una vez definidos los dos grupos de fórmulas alométricas, se realizó un análisis de sensibilidad de nuestros resultados a las dos fórmulas aplicadas a los *Quercus*. Se usó un DAP “arbitrario”, el cual oscilaba entre 1 y 88 cm (mínimo y máximo registrado en campo), y el DAP por transecto registrado en campo (promedio de las clases diamétricas de los encinos en ambas secciones por transecto). Este análisis consistió en aplicar una variación de -30% y +30% del DAP para compararlos con los diámetros arbitrarios y los diámetros registrados en campo. De esta forma, se identificaron los intervalos diamétricos en los que las fórmulas pueden otorgar resultados con menos incertidumbre. Este análisis se realizó siguiendo la metodología propuesta por Millard (2013). El análisis de datos fue realizado por medio del software estadístico R (Core Team 2016).

**Cuadro 4.** Fórmulas alométricas y ecuaciones para la estimación de biomasa arbórea.

Grupo de Especies	Fórmula	Autor
Grupo 1		
Coníferas	$(0.5 \times 0.0752 \times DAP)^{2.4448} \times 2.0331 \times 0.55$	Návar (2009)
Encinos	$(0.5 \times 0.0752 \times DAP)^{2.4448} \times 2.0331 \times 0.63$	Návar (2009)
Especies de BT que son diferentes a pinos y encinos	$\frac{(0.5 \times 0.5 + 25,000 \times DAP)^{2.5}}{DAP^{2.5} + 246,872}$	Penman et al. (2003)
Grupo 2		
Coníferas	$(0.5 \times 0.0752 \times DAP)^{2.4448} \times 2.0331 \times 0.55$	Návar (2009)
Encinos	$(0.0342) \times (DAP^{2.759}) \times (0.5)$	Aguilar et al. (2012)
Especies de BT que son diferentes a pinos y encinos.	$\frac{(0.5 \times 0.5 + 25,000 \times DAP)^{2.5}}{DAP^{2.5} + 246,872}$	Penman et al. (2003)

DAP= Diámetro a la Altura del Pecho en cm. Las unidades de salida de las fórmulas son Kg de carbono, debido a que se incorporó a los cálculos la cantidad de carbono en materia vegetal seca según el IPCC (1994).

#### Muestreo y estimación de carbono total en suelos

Las muestras de suelo se obtuvieron en los 25 sitios donde se realizaron los muestreos de vegetación, por medio de un barreno de 20 cm de largo por 8.2 cm de diámetro. En cada sitio de muestreo se realizaron cuatro barrenas en los vértices de la parcela, con los cuales se obtuvo una muestra compuesta. Posteriormente, las muestras compuestas fueron secadas y analizadas en el laboratorio. Para obtener la cantidad de carbono en suelos se usó la detección coulométrica, mediante un analizador de carbono modelo UIC, siguiendo la metodología de Chávez (2015). Posteriormente, se estimó la densidad aparente del suelo usando la metodología de Flores y Alcalá (2010). Por último, se determinó la cantidad total de C estimada en  $Mg\ ha^{-1}$  de la siguiente manera:

$$CS = \frac{((\rho b * PS) * 10,000) * cC}{1000}$$

$$\frac{CS}{1000} * 10,000$$

Dónde: *CS*= Carbono en suelos; *pb*= Densidad aparente del suelo; *PS*= Profundidad del suelo; *cC*= Concentración de carbono.

### Índice de aridez UNEP

Se obtuvo el índice de aridez (IA) (UNEP 1992), el cual permite clasificar la zona de estudio en categorías de humedad y aridez. Este índice propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) define la aridez mediante la interrelación de la temperatura con la precipitación y la radiación solar, basándose en el supuesto de que un incremento en la temperatura aumenta positivamente la evapotranspiración. El IA expresa la relación entre la precipitación anual promedio y la evapotranspiración potencial en un área determinada (UNEP 1992). Este índice define 6 clases de aridez, desde la hiperárida hasta la húmeda (Cuadro 5)

$$I = P/ETP$$

$$ETP = 0.0023(T^{\circ}m + 17.78)(EVP)(T^{\circ}max - T^{\circ}min)^{0.5}$$

Dónde: *I*= índice de aridez; *P*= precipitación anual; *EVP*= Evaporación potencial anual; *ETP*= Evapotranspiración potencial; *T*<sup>°m</sup>= Temperatura media; *T*<sup>°máx</sup>= Temperatura máxima y *T*<sup>°mín</sup>= Temperatura mínima.

Este índice se obtuvo con los datos de precipitación y temperatura para la zona de estudio, los cuales fueron extraídos de las superficies climáticas para México de Cuervo-Robayo et al. (2013). Adicionalmente se usaron los datos de radiación solar promedio para cada transecto con la aplicación Surface Meteorology and Solar Energy (NASA, 2018).

**Cuadro 5.** Clases de aridez con base en el índice propuesto por la UNEP (1992).

Clase	Índice
Hiperárida	<0.05
Árida	0.05 - 0.2
Semiárida	0.2 -0.5
Subhúmeda seca	0.5 - 0.65
Subhúmeda húmeda	0.65 -1.0
Húmeda	>1

### Modelo lineal generalizado

Se realizaron una serie de modelos lineales generalizados (MLG) en el software estadístico R (Core Team 2016), usando en primer lugar como variables independientes la altitud y la aridez, siendo las variables dependientes la cantidad de carbono total en el suelo y el carbono en la biomasa arbórea. Posteriormente, se probó si la diversidad de especies influye en los almacenes de carbono, por lo que se realizó también un MLG, utilizando como variable independiente el índice de diversidad Shannon-Wiener y como dependiente la concentración de carbono total en el suelo y en la biomasa arbórea. Con el fin de evaluar que distribución podría ser usada en el análisis MLG, se realizó una prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov (prueba K-S) a cada conjunto de datos, con el paquete *fitdistrplus* (Delignette-Muller y Dutang 2015).

## Resultados

En el área de estudio se encontraron un total de 49 especies de árboles con 1,574 registros. De estas especies, fueron 18 de encinos y 9 de coníferas. Dichas especies se encuentran distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal: entre 800 y 2,500 msnm. Se registraron tres especies endémicas al área de estudio: *Pinus jaliscana*, *Quercus cualensis*, y *Q. tuitensis*. Los valores promedio del IA fueron de 1.29, con un mínimo de 0.80 y un máximo de 1.86, el cual corresponde a zonas húmedas según la UNEP (1992) (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** esumen de datos de temperatura, precipitación e índice de aridez por transecto.

Transecto	Tipo de Vegetación	Temperatura	Precipitación	IA
T01	BTPQ	19.75	1448.11	1.07
T02	BTQ	18.71	1365.60	1.04
T03	BPQ	14.92	1525.33	1.34
T04	BPQ	15.50	1468.95	1.26
T05	BTPQ	18.88	1318.72	0.99
T06	BTPQ	19.45	1353.63	1.00
T07	BTPQ	19.66	1375.19	1.01
T08	BTPQ	19.20	1363.08	1.02
T09	BTPQ	18.30	1335.74	1.03
T10	BTPQ	19.81	1419.79	1.04
T11	BTPQ	19.95	1433.58	1.05
T12	BTPQ	19.73	1451.01	1.08
T13	BPQ	13.37	1678.41	1.60
T14	BPQ	14.05	1616.95	1.48
T15	BPQ	14.74	1540.82	1.36
T16	BQP	15.57	1450.28	1.23
T17	BTPQ	16.72	1300.97	1.08
T18	BPQ	14.82	1521.73	1.39
T19	BPQ	12.98	1715.38	1.75

T20	BPQ	12.18	1742.03	1.86
T21	BPAQ	11.68	1740.54	1.83
T22	BPQ	12.59	1733.84	1.72
T23	BPQ	13.24	1697.43	1.63
T24	BMM	12.83	1724.11	1.69
T25	BTQ	19.38	1068.78	0.80

BTPQ= Bosque tropical de *Pinus* y *Quercus*; BTQ= Bosque tropical del *Quercus*; BPQ= Bosque de *Pinus* y *Quercus*; BQP= Bosque de *Quercus* y *Pinus*; BPAQ= Bosque de *Pinus*, *Abies* y *Quercus*; BMM= Bosque mesófilo de montaña

### Estructura diamétrica del bosque

El DAP promedio en la zona de estudio es de 17.7 cm (DE  $\pm$  12.3) la clase diamétrica más abundante es la clase 1 seguida por la clase 2. En la Cuadro 7 se presentan los resultados de número de individuos registrados, clases diamétricas, clase diamétrica más abundante y DAP obtenido de los 25 transectos, además del tipo de vegetación.

Para la zona de estudio, el transecto T21 es donde se presenta el mayor promedio de DAP, que corresponde a un bosque de *Pinus*, *Abies* y *Quercus* (BPAQ) localizado a una altitud de 2,507 msnm. En el T21 la mayoría de los individuos son *Pinus ayacahuite*, *P. herrerae*, *P. maximinoi*, *Abies sp.* y *Quercus scytophylla*. En este transecto, los árboles tienen un diámetro promedio de 28 cm y pueden llegar hasta 88.8 cm, con un mínimo de 4.5 cm. La desviación estándar de este transecto es de 21.1 cm. La clase diamétrica más abundante es la clase 1 con 24 registros, la clase 2 tiene 16 registros, seguida de la clase 3 con 6 transectos, la clase 4 con 5 y 1 registro de la clase 5. El transecto T22 es el que presenta el diámetro promedio menor, el cual corresponde a un bosque de pino y encino (BPQ), localizado a 2,439 msnm. En este transecto las especies importantes son: *P. douglasiana*, *P. herrerae*, *P. lumholtzi*, *P. maximinoi*, *Q. jonesi* y *Q. scytophylla*. El diámetro promedio es de 13 cm, con un máximo de 38.2 cm y un mínimo de 4.8 cm. La desviación estándar de este transecto es de 10.1 cm. La clase diamétrica más abundante es la clase 1 con 28 registros, sin embargo, tiene 11 registros en la clase 2.

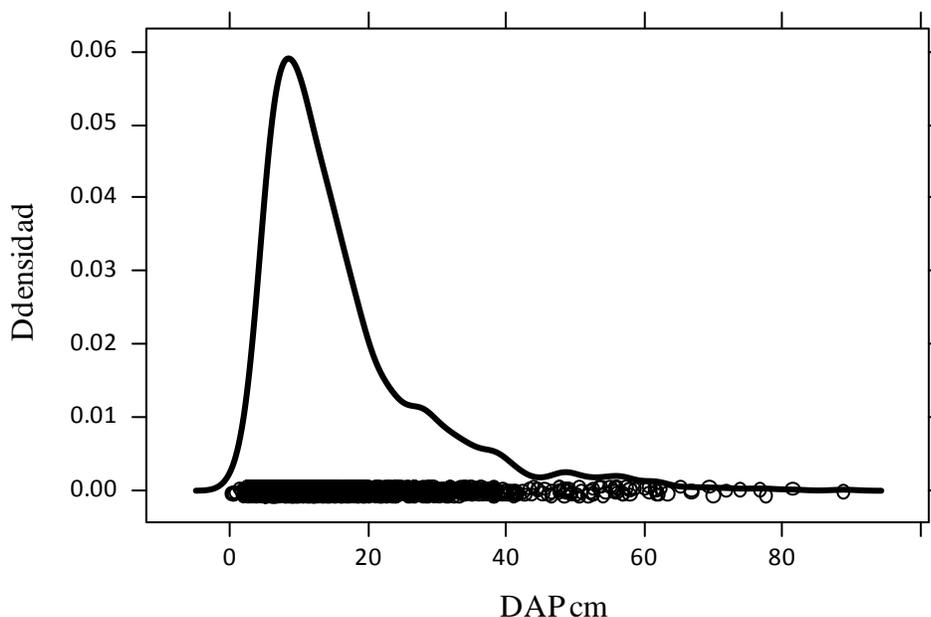
**Cuadro 7.** Resumen de datos por transecto indicando el tipo de vegetación, número de individuos registrados, clases diamétricas encontradas, clase diamétrica más abundante y diámetro a la altura del pecho (promedio y su desviación estándar).

Transecto	Tipo de Vegetación	N° de individuos registrados	Clases diamétricas encontradas (cm)	Promedio DAP
T01	BTPQ	101	<u>1</u> , 2, 3	9.3 (6.9)
T02	BTQ	82	<u>1</u> , 2 y 3	13.9 (5.9)
T03	BPQ	74	<u>1</u> y 2	13.2 (6.6)
T04	BPQ	53	<u>1</u> y 2	15.1 (6.4)
T05	BTPQ	57	<u>1</u> , 2 y 3	17.3 (11.0)
T06	BTPQ	93	<u>1</u> , 2, 3 y 4	13.5 (9.2)
T07	BTPQ	75	<u>1</u> , 2, 3 y 4	13.9 (12.1)
T08	BTPQ	117	<u>1</u> , 2 y 3	12.2 (9.0)
T09	BTPQ	47	<u>1</u> , 2, 3 y 4	17.1 (12.2)
T10	BTPQ	16	<u>1</u> , 2 y 3	21.3 (13.4)
T11	BTPQ	42	<u>1</u> , 2, 3 y 4	20 (16.2)
T12	BTPQ	24	<u>1</u> , 2 y 3	26.9 (15.7)
T13	BPQ	52	<u>1</u> , 2 y 3	14.8 (10.3)
T14	BPQ	77	<u>1</u> , 2, 3 y 4	15.9 (10.1)
T15	BPQ	89	<u>1</u> , 2 y 3	14.7 (9.2)
T16	BQP	66	<u>1</u> , 2, 3 y 4	15 (10.5)
T17	BTPQ	81	<u>1</u> , 2, 3 y 4	14.5 (10.8)
T18	BPQ	88	<u>1</u> , 2 y 3	17.2 (12.3)
T19	BPQ	37	<u>1</u> , 2 y 3	22.3 (17.0)
T20	BPQ	68	<u>1</u> , 2, 3, 4 y 5	20.2 (18.2)
T21	BPAQ	52	<u>1</u> , 2, 3, 4 y 5	28.7 (21)
T22	BPQ	39	<u>1</u> y 2	13.2 (10)
T23	BPQ	46	<u>1</u> , 2 y 3	21.7 (9.8)
T24	BMM	27	<u>1</u> , 2, 3 y 4	35.3 (17.2)
T25	BTQ	71	<u>1</u> , 2 y 3	15.1 (9.8)

DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); BTPQ= Bosque tropical de *Pinus* y *Quercus*; BTQ= Bosque tropical del *Quercus*; BPQ= Bosque de *Pinus* y *Quercus*; BQP= Bosque de *Quercus* y *Pinus*; BPAQ= Bosque de *Pinus*, *Abies* y *Quercus*; BMM= Bosque mesófilo de montaña; Clases diamétricas: 1) 0-20 cm, 2) 20-40 cm, 3) 40-60 cm, 4) 60-80 cm y 5) 80-100 cm. En paréntesis la desviación estándar del DAP. La clase diamétrica más abundante se indica en negritas y subrayado.

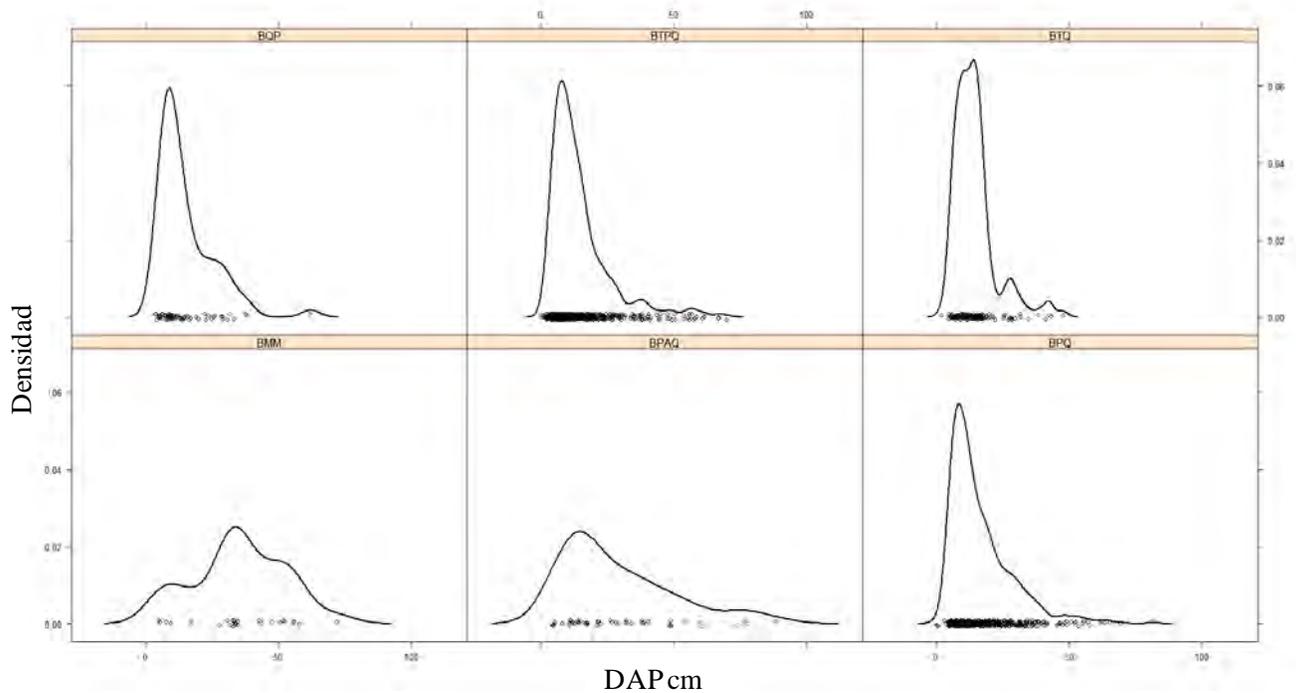
El diámetro máximo registrado a la altura del pecho en la zona de estudio fue de 88.8 cm correspondiente a un individuo de *Q. scytophylla* en el transecto T21 ubicado a los 2,507 msnm y el mínimo de 0.3 cm correspondiente a un individuo de *Q. iltisii* (de múltiples

tallos) dentro del T11 situado a los 905 msnm. El promedio del DAP fue de 16.2 cm (Figura 4) con una desviación estándar de 12.3 cm.



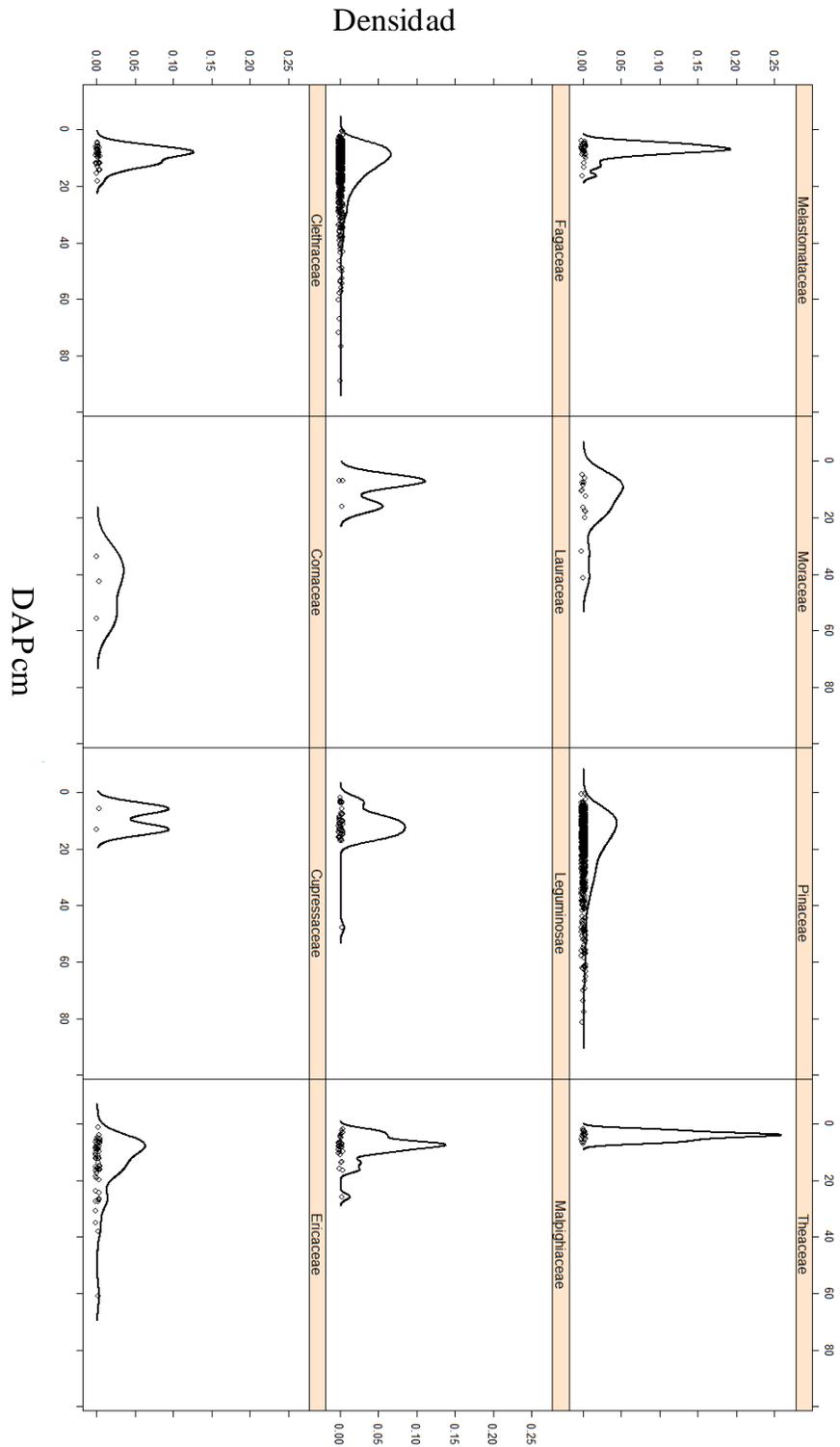
**Figura 4.** Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho en el área de estudio.

El DAP promedio por tipo de vegetación fue de 35.3 cm y 28.8 cm para *BMM* y *BPAQ*, respectivamente. En el BMM los diámetros registrados variaban entre 5.1 cm para un individuo de la especie *Q. scytophylla*, hasta 71.9 cm en un individuo de *Q. laurina*, con una desviación estándar de 17.2 cm. Por otro lado, en el BPAQ se registraron diámetros desde 4.5 cm en un individuo de la especie *P. maximinoi*, hasta el diámetro más grande registrado en este estudio, el cual fue de un individuo de *Q. scytophylla* de 88.8 cm (Figura 5), este tipo de vegetación presentó la mayor desviación estándar en sus datos de 21.1 cm. Los tipos de vegetación: *BQP*, *BTPQ*, *BTQ* y *BPQ* se diferenciaron de los dos tipos de vegetación anteriores en que sus valores promedio, máximo y mínimo fueron menores a los registrados en BMM y BPAQ. El diámetro promedio de los cuatro tipos de vegetación se encontró alrededor de los 15.2 cm, con un valor máximo de hasta 65.3 cm y mínimo de 1.6 cm (Figura 5), con una desviación estándar de 10.4.



**Figura 5.** Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho en el sitio de estudio.

Dentro de estos seis tipos de vegetación se identificaron 17 familias de individuos arbóreos, las cuales son: Asteraceae, Betulaceae, Clethraceae, Clusiaceae, Cornaceae, Cupressaceae, Ericaceae, Fagaceae, Lauraceae, Leguminosae, Malpighiaceae, Melastomataceae, Moraceae, Myricaceae, Myrtaceae, Pinaceae, Theaceae. En la Figura 6 y Cuadro 8 se puede apreciar que las familias: Cornaceae, Fagaceae, Moraceae, Myricaceae y Pinaceae fueron las familias que presentan un mayor DAP promedio. Las familias Fagaceae y Pinaceae fueron las que tienen un mayor número de individuos y estuvieron presentes en todos los transectos y en todos los tipos de vegetación, con un rango diamétrico muy amplio.



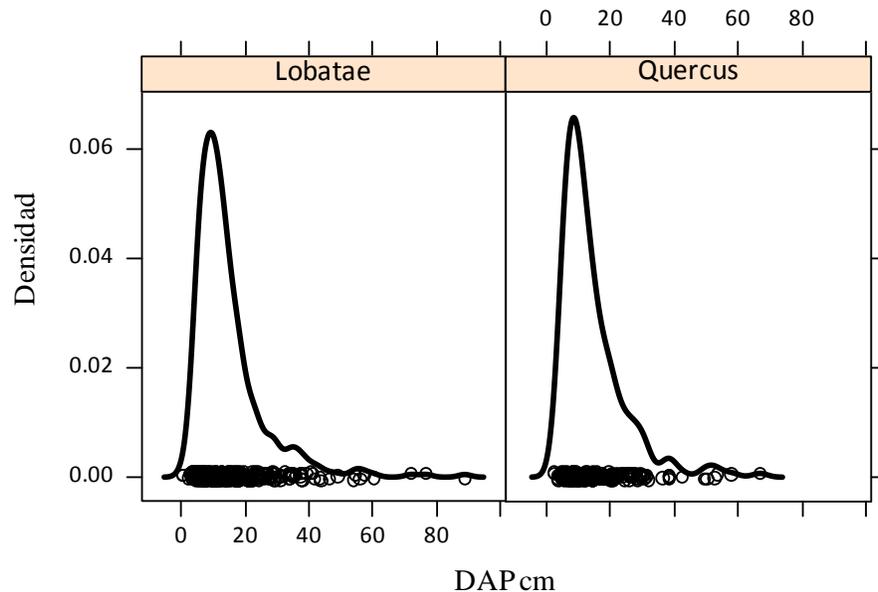
**Figura 6.** Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho por familia vegetal.

**Cuadro 8.** Resumen de datos por familia vegetal indicando número de individuos registrados y diámetro a la altura del pecho (promedio, Mín.=mínimo, Máx.=máximo y su desviación estándar).

Familia	Número de Individuos Registrados	Promedio DAP	Máx. DAP	Mín. DAP
Asteraceae	1	13.3 (ND)	13.3	13.3
Betulaceae	1	35 (ND)	35	35
Clethraceae	36	9.5 (3.15)	18.1	4.4
Clusiaceae	3	9.2 (2.77)	11.1	6
Cornaceae	3	44 (11.04)	55.7	33.7
Cupressaceae	2	9.3 (5.18)	13	5.7
Ericaceae	60	13.8 (10.22)	60.8	1.2
Fagaceae	661	14.4 (10.83)	88.8	0.3
Lauraceae	3	9.9 (5.15)	15.9	7
Leguminosae	45	11.7 (6.49)	47.7	1.5
Malpighiaceae	29	8.4 (4.97)	25.7	1.9
Melastomataceae	27	7.4 (2.79)	16.2	3.8
Moraceae	14	15.1 (10.41)	41.3	4.7
Myricaceae	1	15.6 (ND)	15.6	15.6
Myrtaceae	2	6 (0.45)	6.3	5.7
Pinaceae	665	19.8 (13.79)	81.4	0.3
Theaceae	21	4.3 (1.47)	7	1.9

DAP= diámetro a la altura del pecho; ND= no disponible; entre paréntesis la desviación estándar del DAP; Los diámetros mínimos incluyen los registrados de individuos de múltiples tallos.

En el caso de las dos secciones que componen al género *Quercus* de la familia Fagaceae, la sección *Lobatae* (encinos rojos) tuvo un diámetro promedio a la altura de pecho de 14.6 cm, con un valor máximo de 88.8 cm en un individuo de la especie *Q. scytophylla* y un valor mínimo de 0.3 cm en un individuo de *Q. iltisii*; en la sección *Quercus* (encinos blancos) tuvo un diámetro promedio de 14.2 cm, con un máximo de 66.8 cm en un individuo de *Q. resinosa* y un mínimo de 2.2 cm en uno de *Q. magnoliifolia*. La desviación estándar del DAP fue mayor en los encinos rojos (11.2 cm) que en los encinos blancos (10.2 cm). Por otro lado, los encinos rojos fueron más abundantes en los muestreos con 417 individuos, mientras que de los encinos blancos se registraron 244 individuos. Por último, la sección *Lobatae* es la que presenta especies endémicas al área de estudio: *Q. cualensis*, *Q. iltisii*, *Q. tuitensis*.



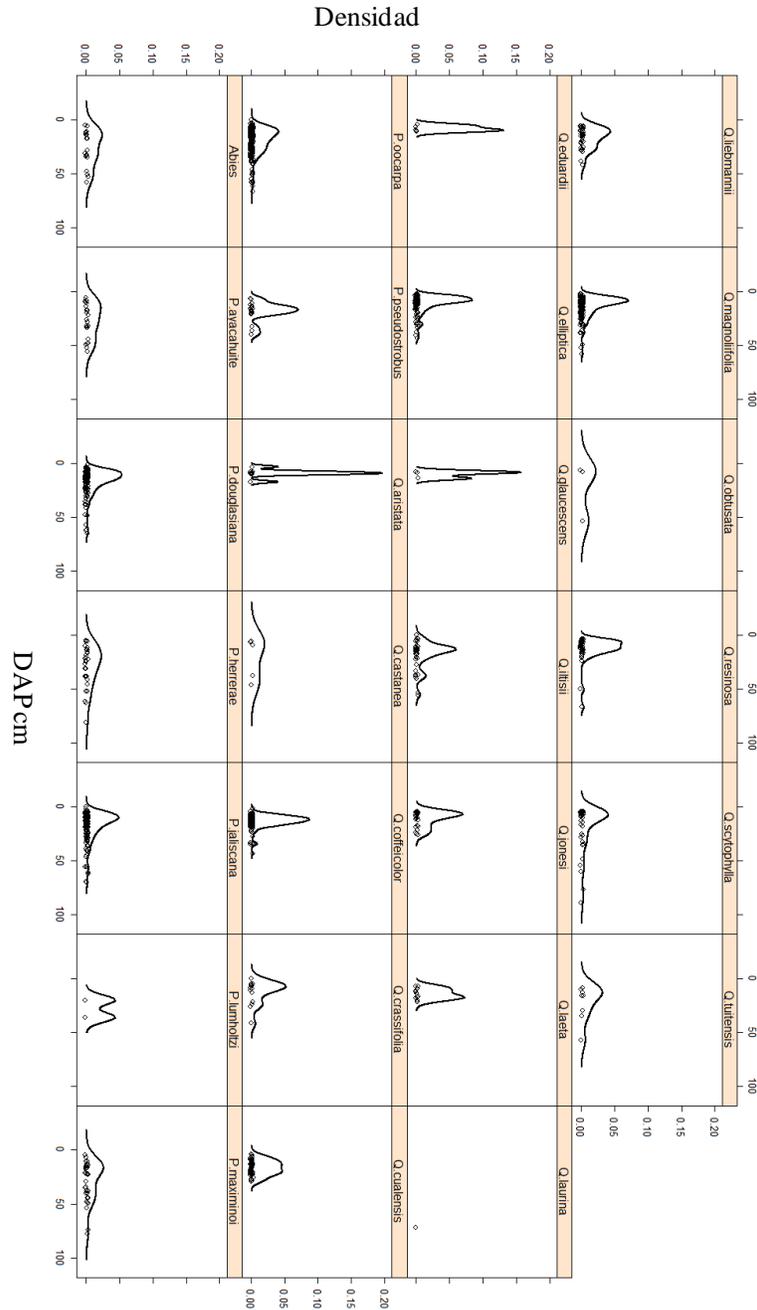
**Figura 7.** Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho para las secciones de la familia Fagaceae.

La familia Fagaceae y las coníferas sumaron 27 especies y el registro de todos sus individuos representaron el 84% de toda la muestra (Cuadro 7 y Figura 8), distribuidas a lo largo de todo el gradiente altitudinal (Anexo 1), pero no de manera homogénea. Existen especies con pocos individuos registrados como *Q. laurina*, *Q. obtusata*, *Q. glaucescens* y *P. lumholtzi*. Dentro de las coníferas, las especies que presentaron los DAP más grandes son, en orden decreciente: *P. herrerae*, *P. maximinoi*, *P. jaliscana*, *P. oocarpa*, *P. douglasiana*, *Abies* sp. y *Pinus ayacahuite* (Cuadro 9, Figura 8). En la familia Fagaceae, las especies que presentaron los DAP más grandes fueron, en orden decreciente: *Q. scytophylla*, *Q. laurina*, *Q. resinosa*, *Q. magnoliifolia*, *Q. iltisi*, *Q. tuitensis* y *Q. obtusata* (Cuadro 9, Figura 8). Hubo especies de coníferas como los *P. maximinoi* que se localizaron en zonas bajas entre los 800 y 1,000 msnm, con DAP promedio de 28.3 cm. Por su parte, los *Abies* sp. se distribuyeron entre los 2,300 y 2,500 msnm con DAP promedio de 26.4 cm. Por su parte, *P. jaliscana* se le encontró entre los 1,600 y 2,000 msnm con DAP promedios de 17.9 cm. En el caso de los encinos, *Q. iltisi* se distribuyó alrededor de los 900 msnm y tuvo DAP promedio de 18.7 cm; *Q. magnoliifolia* se encontró entre los 1,000 y los 2,000 msnm con DAP promedio de 13.7 cm. Por último *Q. scytophylla* se distribuyó entre los 2,300 y 2,500 msnm con DAP promedio de 18.6 cm (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Resumen de datos de diámetro a la altura del pecho en especies de la familia Fagaceae y las coníferas (promedio, Mín.=mínimo, Máx.=máximo) Entre paréntesis desviación estándar del DAP.

Especie	Promedio DAP	Máx. DAP	Mín. DAP	Especie	Promedio DAP	Máx. DAP	Mín. DAP
<b>Especies de coníferas</b>				<b>Especies de Fagaceas</b>			
<i>Abies sp.</i>	26.4 (16.3)	57.9	5.2	<i>Q. aristata</i>	9.5 (3.6)	17.5	3.5
<i>P. ayacahuite</i>	27.2 (16)	56	5.7	<i>Q. castanea</i>	21.3 (19.1)	46.4	6.3
<i>P. douglasiana</i>	16.6 (11.5)	65.2	0.6	<i>Q. coffeicolor</i>	13.9 (6.4)	43.2	2
<i>P. herrerae</i>	29 (19.1)	81.4	5	<i>Q. crassifolia</i>	13 (10.9)	41.7	0.4
<i>P. jaliscana</i>	17.9 (13.8)	70	0.4	<i>Q. cualensis</i>	16.6 (6.9)	29.6	3.8
<i>P. lumholtzi</i>	28.3 (11.2)	36.2	20.3	<i>Q. eduardii</i>	8.3 (2.6)	11.1	4.7
<i>P. maximinoi</i>	28.2 (18.1)	77.6	4.4	<i>Q. elliptica</i>	11.2 (8.4)	43.6	2.5
<i>P. oocarpa</i>	19.4 (12)	66.8	0.3	<i>Q. glaucescens</i>	10.6 (3.2)	14.3	8.2
<i>P. pseudostrabus</i>	18.8 (8.6)	40.2	6.6	<i>Q. iltisii</i>	18.6 (12.7)	56	0.3
				<i>Q. jonesi</i>	11.5 (7.1)	26.1	4.7
				<i>Q. laeta</i>	14.6 (4.8)	21.9	7.3
				<i>Q. laurina</i>	71.9 (/)	71.9	71.9
				<i>Q. liebmannii</i>	17 (9.6)	42.3	5.7
				<i>Q. magnoliifolia</i>	13.7 (9.8)	57.9	2.2
				<i>Q. obtusata</i>	22.8 (26.5)	53.4	7
				<i>Q. resinosa</i>	13.3 (11.5)	66.8	3.8
				<i>Q. scytophylla</i>	18.6 (20.8)	88.8	4.7
				<i>Q. tuitensis</i>	21.8 (16.1)	57.3	8.9

DAP= diámetro a la altura del pecho; Entre paréntesis desviación estándar del DAP. ND= No disponible; Los diámetros mínimos incluyen los registrados de individuos de múltiples tallos.



**Figura 8.** Función de densidad de los diámetros a la altura del pecho de las especies de la familia Fagaceae y las coníferas.

Análisis de diversidad en las Serranías Occidentales

Es importante señalar que ninguno de los 24 transectos tuvo un índice mayor a 1, por lo que, se considera que cada sitio tiene una diversidad específica baja, siendo el transecto T14, ubicado a 1,864 msnm en BPQ, el de mayor diversidad (0.83 en el índice de

diversidad de Shannon-Wiener) y el transecto T10, ubicado a 892 msnm en BTPQ, el de menor diversidad (0.79 en el índice de diversidad de Shannon-Wiener). La prueba de bondad de ajuste sugirió que los datos de diversidad de Shannon-Wiener siguieron una distribución Log-Normal ( $K-S = 0.12$ ).

### Almacén de carbono en biomasa arbórea en las Serranías Occidentales

Los valores de carbono obtenidos con el G1 para la zona se encontraron en un rango de 19.4 Mg C ha<sup>-1</sup> a 176.1 Mg C ha<sup>-1</sup> y los valores de carbono del G2 se encontraron en un rango de 19.1 Mg C ha<sup>-1</sup> a 202.9 Mg C ha<sup>-1</sup> (Cuadro 10). En ambas estimaciones alométricas el transecto T21 fue el que registró mayor cantidad de carbono, el cual se encontró a 2,416 msnm en BPAQ. Este transecto tuvo un almacén promedio de carbono de 3.4 Mg C ha<sup>-1</sup> en ambos grupos alométricos. Su máximo cantidad de carbono fluctuó entre 27.9 Mg C ha<sup>-1</sup> (G1) y 40.6 Mg C ha<sup>-1</sup> (G2), con valores mínimos que fluctuaron entre 0.02 Mg C ha<sup>-1</sup> (G1) y 0.01 Mg C ha<sup>-1</sup> (G2). El transecto con la menor cantidad de carbono estimada fue el T22 situado a 2,439 msnm en BPQ. Este transecto tuvo un valor promedio de 0.51 Mg C ha<sup>-1</sup> en ambos grupos alométricos. Su máxima cantidad de carbono se estableció en 3.1 Mg C ha<sup>-1</sup> para ambos grupos alométricos, con valores mínimos que fluctuaron entre 0.02 Mg C ha<sup>-1</sup> (G1) y 0.01 Mg C ha<sup>-1</sup> (G2).

**Cuadro 10.** Contenido de carbono por transecto para el G1 y G2.

Transecto	Altitud msnm	G1 Mg C ha <sup>-1</sup>	G2 Mg C ha <sup>-1</sup>	Transecto	Altitud msnm	G1 Mg C ha <sup>-1</sup>	G2 Mg C ha <sup>-1</sup>
T01	952	23.2	22.4	T14	1848	55.5	53.9
T02	999	33.8	32.3	T15	1767	49.9	50
T03	1869	27.4	27	T16	1637	46.7	46.6
T04	1820	24.4	23	T17	1570	53	51.3
T05	1153	53.6	56.2	T18	1868	81	83.5
T06	1020	46.6	46.2	T19	2200	67.8	73.5
T07	990	53.1	51.9	T20	2416	119.3	119.6
T08	1078	50.3	50.3	T21	2507	176.1	202.9

T09	1215	45.2	50.7	T22	2439	19.4	19.1
T10	892	20.9	20.6	T23	2060	50.1	49.7
T11	905	63.8	63.4	T24	2321	105.7	111.7
T12	897	55.2	61.2	T25	1208	51.4	51.3
T13	2051	32.1	31.8				

G1= Grupo alométrico 1; G2=Grupo alométrico 2.

### Almacén de carbono en suelos en las Serranías Occidentales

Lo valores de carbono en suelos obtenidos para la zona se encontraron en un rango de 5.9 a 82.5 Mg C ha<sup>-1</sup>. Siendo el transecto T19 el de mayor cantidad de carbono en suelos, el cual se sitúa a los 2,200 msnm en BPQ. El de menor cantidad de carbono fue el transecto T8 situado a 1,078 msnm en BTPQ (Cuadro 11).

Cuadro 11. Resultados de carbono en suelos por transecto para los primeros 20 cm del suelo.

Transecto	Altitud	Carbono en Suelos Mg C ha <sup>-1</sup>
T01	952	16.7
T02	999	25.9
T03	1869	45.3
T04	1820	16.4
T05	1153	11.5
T06	1020	23.6
T07	990	28.9
T08	1078	5.9
T09	1215	19.9
T10	892	20
T11	905	26.6
T12	897	11.9
T13	2051	48.1
T14	1848	18.5

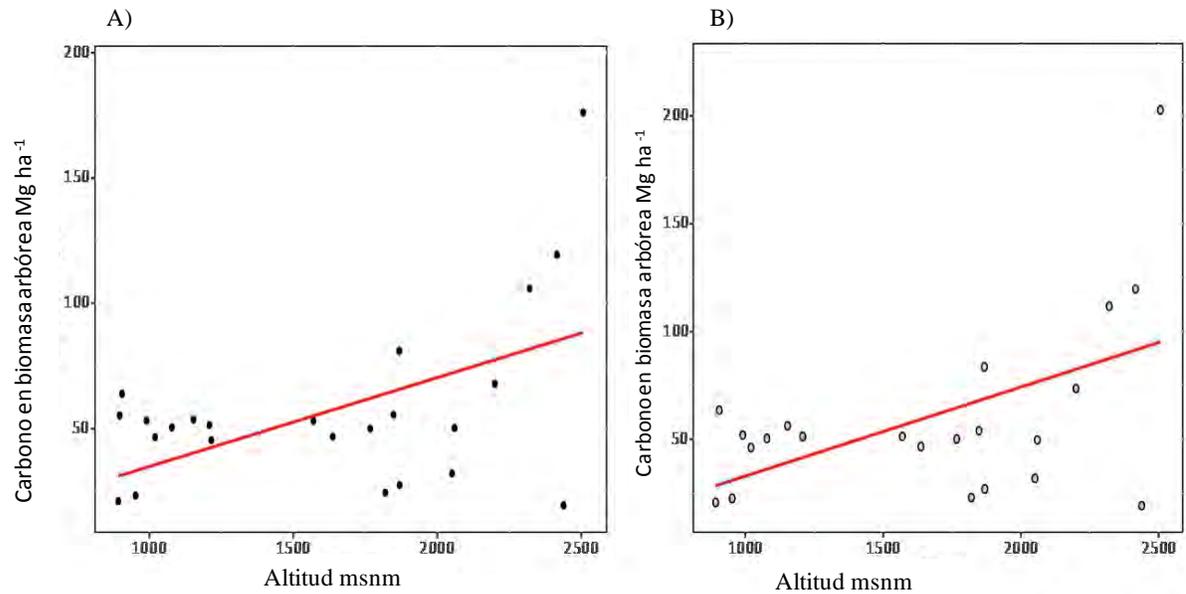
T15	1767	11.4
T16	1637	17.6
T17	1570	12
T18	1868	40.9
T19	2200	82.5
T20	2416	48.7
T21	2507	73.3
T22	2439	51.3
T23	2060	13.7
T24	2321	22.4
T25	1208	13.2

Análisis estadístico: efecto de los gradientes ambientales en el carbono en biomasa arbórea

**Carbono en biomasa arbórea en función de la altitud.**

Los resultados en cantidad de carbono para la zona de estudio demostraron un aumento estadísticamente significativo en la cantidad

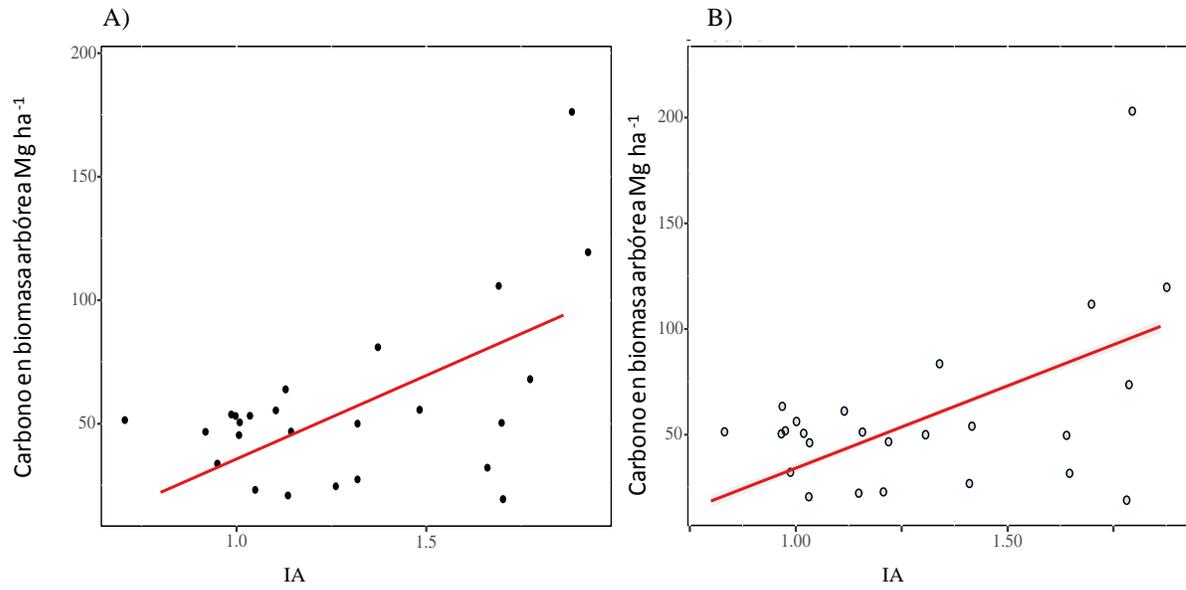
de carbono conforme se incrementa la altitud, en ambos grupos ( $p < 0.01$ ) (Figura 9 y Cuadro 12). Esta relación fue mayor si se considera el uso del G2 de fórmulas alométricas (Figura 9 y Cuadro 12).



**Figura 9.** Relación entre altitud y el carbono en biomasa arborea estimado en ambos grupos de fórmulas alométricas: A) G1 y B) G2.

### **Carbono en biomasa arborea en función de la aridez.**

Se encontró una relación positiva estadísticamente significativa ( $p < 0.01$ ) entre el IA y el carbono almacenado en la biomasa arborea. Esta relación explicó el 32% de la variación en la biomasa arborea para ambos grupos. Por lo que, las zonas de mayor humedad, mayor precipitación, menor evapotranspiración y con menor temperatura son las zonas con mayor cantidad de carbono en la biomasa arborea (Figura 10 y Cuadro 12).



**Figura 10.** Efectos del IA en el carbono en biomasa arborea en ambos grupos de fórmulas alométricas: A) G1 y B) G2.

**Cuadro 12.** Resumen estadístico de la relación entre el carbono en biomasa arborea con la altitud y el IA.

Grupo Alométrico		Altitud	Intersección	Pseudo R <sup>2</sup>	IA	Intersección	Pseudo R <sup>2</sup>	
Carbono en biomasa arborea	G1	Intervalos de confianza	1 (1.001.00) **	7.89 (6.2041.86) ***	0.27	3.19 (1.61-7.14) **	11.55 (3.12-31.27) ***	0.32
		Error estándar	0	7.89		1.04	5.85	
	G2	Intervalos de confianza	1 (1.001.00) **	16.7 (4.15-41.21) ***	0.28	3.65 (1.71-9.45) **	9.81 (2.04-30.09) ***	0.32
		Error estándar	0	7.93		1.33	5.63	

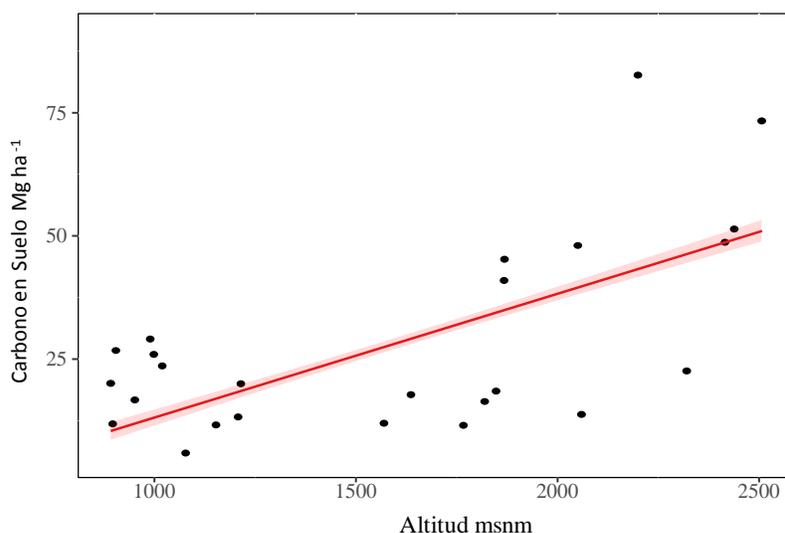
Notas: Valores de p indican significancia al que los parámetros fueron estadísticamente significativos.

\*p<0.05 \*\*p<0.01 \*\*\*p<0.001

**Carbono en biomasa arbórea en función de la diversidad.** No se encontró una relación estadísticamente significativa entre el índice de diversidad y el carbono en la biomasa arbórea para ambos modelos ( $p < 0.05$ ) por lo que no tenemos evidencia para decir que el contenido de carbono fue sensible a cambios en el número de especies de un sitio.

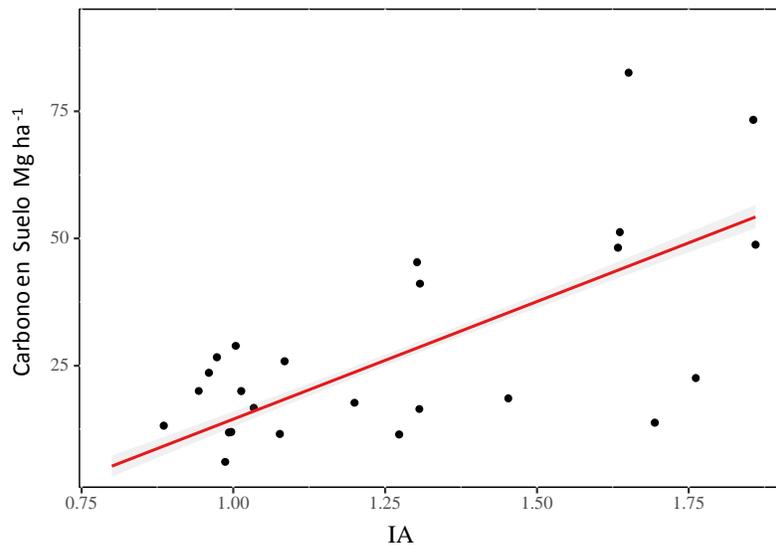
*Análisis estadístico: efecto de los gradientes ambientales en el carbono en suelo*

**Carbono en suelo en función de la altitud.** Se encontró una relación positiva estadísticamente significativa entre la altitud y el carbono en el suelo ( $p < 0.001$ ), lo cual indica que un aumento en la cantidad de carbono en suelo está directamente relacionado a un aumento de la altitud (Figura 11 y Cuadro 13).



**Figura 11.** Relación entre altitud y el carbono total en suelos.

**Carbono en suelo en función de la aridez.** Se encontró una relación positiva estadísticamente significativa entre el carbono en suelos y el IA ( $p < 0.001$ ), la cual explicó el 52% de la variación del carbono en el suelo. Por lo que las zonas de mayor humedad, mayor precipitación, menor evapotranspiración y con menor temperatura expresadas en el índice de aridez más altos (1.7 a 1.9 del IA) fueron las zonas con mayor cantidad de carbono en suelos (Figura 12 y Cuadro 13). Las cantidades de carbono en biomasa arbórea y carbono total suelos se encontraron en mayor medida condicionados por la relación entre humedad y temperatura, la cual es expresada en el índice de aridez.



**Figura 12.** Efectos de la aridez en el carbono total en suelo.

La prueba estadística de bondad de ajuste sugirió que los datos de carbono de ambos modelos y en los suelos siguieron una distribución Log-Normal. (K-S, modelo 1 = 0.16; modelo 2 = 0.16; carbono en suelos = 0.10).

**Cuadro 13.** Resumen estadístico de la relación del carbono en suelo con la altitud y el IA.

		Altitud	Intersección	Pseudo R <sup>2</sup>	IA	Intersección	Pseudo R <sup>2</sup>
<b>Carbono total en suelos</b>	<b>Intervalos de confianza</b>	1 (1.00 – 1.00) ***	0	0.45	4.79 (2.58 – 10.19) **	3.25 (0.92– 8.46) *	0.52
	<b>Error estándar</b>	5.73 (1.71 – 13.37) **	2.67		1.56	1.71	

**Notas:** Valores de p indican el nivel de significancia al que los parámetros estimados fueron estadísticamente significativos.

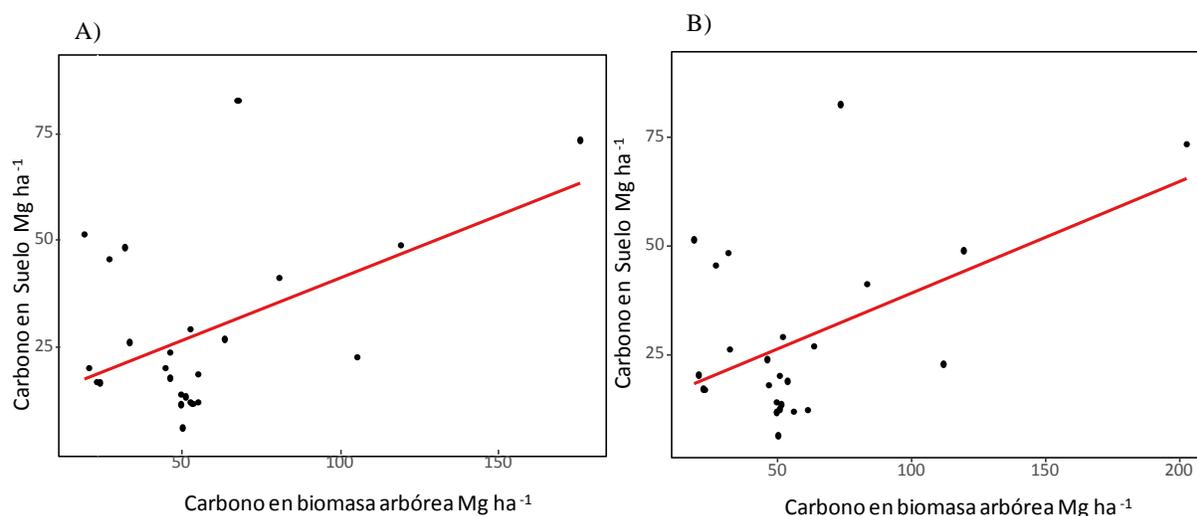
\* p<0.05 \*\* p<0.01 \*\*\* p<0.001

**Carbono en suelo en función de la diversidad.** No se encontró una relación significativa entre el índice de diversidad y el carbono en los suelos ( $p < 0.05$ ) que indique que a mayor diversidad exista una cantidad mayor de carbono en los suelos.

Análisis estadístico: relación entre el carbono en la biomasa arbórea y en los suelos

**Relación entre carbono en la biomasa arbórea y en los suelos.**

Se encontró una relación positiva estadísticamente significativa ( $p < 0.01$ ) entre el carbono en el suelo y el estimado en la biomasa arbórea, la cual explicó el 21% de la variación de la variable dependiente. Esta relación fue ligeramente mayor si se considera el uso del G2 de fórmulas alométricas para obtener las estimaciones de carbono en biomasa arbórea (Figura 13 y Cuadro 14).



**Figura 13.** Efectos del carbono en biomasa arbórea en el carbono en suelo en función de los dos grupos de fórmulas alométricas: A) G1 y B) G2.

**Cuadro 14.** Resumen estadístico de la relación del carbono en biomasa arbórea y carbono en suelo.

Grupo Alométrico		Carbono en suelo Mg de C		
		ha <sup>-1</sup>	Intersección	Pseudo R <sup>2</sup>
Carbono en biomasa arbórea	G1	Intervalos de confianza	1.01	38.21
		Error estándar	(1.00-1.02) **	(24.09-55.54) ***
	G2	Intervalos de confianza	1.01	37.03
		Error estándar	(1.00-1.02) **	(22.10-55.64) ***
			0	7.87
			0	8.37

Notas: Valores de p indican significancia al que los parámetros fueron estadísticamente significativos.

\*p<0.05 \*\*p<0.01 \*\*\*p<0.001

## Almacén de carbono en coníferas y encinos

### **Carbono en la biomasa arbórea de las coníferas.**

La evaluación del carbono arbóreo en coníferas demostró que estas representan el 57.8% del carbono total almacenado para el G1 y el 56.0% para el G2. Los resultados indican que en 17 de los 25 transectos las coníferas aportaron más del 50% del carbono almacenado en biomasa arbórea en ambos grupos. En el T6, el transecto el mayor contenido de carbono con un 87% para G1 y G2. El T25 fue el transecto de menor contenido de carbono con un 3% en ambos grupos.

El transecto con mayor cantidad de C en la biomasa arbórea de las coníferas fue el T20, con 97.0 Mg de C ha<sup>-1</sup> y el de menos cantidad de carbono fue el T25 con 1.9 Mg de C ha<sup>-1</sup>.

### **Carbono en la biomasa arbórea de los encinos.**

Respecto a la evaluación del carbono arbóreo en encinos, estos representaron el 33.9% del carbono total almacenado para el G1 y el 35.9% para el G2. Los resultados indicaron que la sección *Lobatae* aportó más carbono en 17 de los 25 transectos en ambos grupos alométricos y representaron el 22.6% del carbono almacenado para el G1 y el 24.3% para el G2. El carbono almacenado en los encinos de la sección *Quercus* representaron el 11.3% (G1) y el 11.6% (G2) del carbono total almacenado. Dominando los transectos T09, T10 y T18, donde los individuos de esta sección fueron los únicos registrados, además los transectos T15, T16, T17, T19 y T25 fueron los que tienen una mayor cantidad de carbono (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Estimación y aportación de carbono por parte de los *Quercus* en ambas secciones al almacén de carbono.

Transecto	Altitud msnm	Sección del Género <i>Quercus</i> Presente	Aporte de <i>Quercus</i> al G1 Mg C ha <sup>-1</sup> y porcentaje	Aporte de <i>Quercus</i> G2 Mg C ha <sup>-1</sup>	
T01	952	<i>Lobatae</i>	9.3	(40.16%)	8.8 (39.3%)
		<i>Quercus</i>	1.4	(6.11%)	1.1 (5.0%)
T02	999	<i>Lobatae</i>	22.6	(66.88%)	21.1 (65.3%)

T03	1869	<i>Lobatae</i>	11.7	(42.88%)	11.3 (41.9%)
T04	1820	<i>Lobatae</i>	11	(45.26%)	9.9 (43.3%)
		<i>Quercus</i>	3	(12.38%)	2.6 (11.6%)
T05	1153	<i>Lobatae</i>	15.8	(29.58%)	18.4 (32.8%)
T06	1020	<i>Lobatae</i>	2.3	(4.99%)	1.9 (4.1%)
T07	990	<i>Lobatae</i>	6.8	(12.83%)	5.6 (10.9%)
		<i>Quercus</i>	0.5	(0.97%)	0.4 (0.7%)
T08	1078	<i>Lobatae</i>	7	(14.01%)	7.5 (14.9%)
		<i>Quercus</i>	5.8	(11.69%)	5.4 (10.7%)
T09	1215	<i>Quercus</i>	25.4	(56.34%)	31 (61%)
T10	892	<i>Quercus</i>	2.9	(14.02%)	2.6 (12.6%)
T11	905	<i>Lobatae</i>	14.3	(22.53%)	14.2 (22.4%)
		<i>Quercus</i>	1.9	(2.97 %)	1.6 (2.6%)
T12	897	<i>Lobatae</i>	32.8	(59.46%)	38.6 (63%)
		<i>Quercus</i>	5.3	(9.60%)	5.5 (9%)
T13	2051	<i>Lobatae</i>	9.3	(28.95%)	9.1 (28.8%)
		<i>Quercus</i>	1.2	(3.9%)	1 (3.4%)
T14	1848	<i>Lobatae</i>	21.8	(39.3%)	20.4 (37.9%)
		<i>Quercus</i>	1.2	(2.2%)	1 (2%)
T15	1767	<i>Lobatae</i>	3.6	(7.2%)	3.2 (6.3%)
		<i>Quercus</i>	7.7	(15.4%)	8.2 (16.4%)
T16	1637	<i>Lobatae</i>	15	(32.1%)	15.2 (32.6%)
		<i>Quercus</i>	16.6	(35.5%)	16.3 (34.9%)
T17	1570	<i>Lobatae</i>	0.4	(0.9%)	0.3 (0.6%)

		<i>Quercus</i>	11.3	(21.4%)	9.7 (19%)
T18	1868	<i>Quercus</i>	24	(29.7%)	26.6 (31.8%)
T19	2200	<i>Lobatae</i>	9.3	(13.7%)	10.7 (14.6%)
		<i>Quercus</i>	20.7	(30.4%)	24.9 (33.9%)
T20	2416	<i>Lobatae</i>	21.6	(18.1%)	21.9 (18.3%)
		<i>Quercus</i>	0.06	(0.05%)	0.04 (0.03%)
T21	2507	<i>Lobatae</i>	76.1	(43.2%)	102.98 (50.7%)
T22	2439	<i>Lobatae</i>	3.5	(18.1%)	3.21 (16.7%)
T23	2060	<i>Lobatae</i>	4.6	(9.2 %)	4.18 (8.4%)
		<i>Quercus</i>	3.1	(6.3%)	3.22 (6.4%)
T24	2321	<i>Lobatae</i>	16.7	(15.8%)	22.73 (21.4%)
		<i>Quercus</i>	0.08	(0.07%)	0.05 (0.05%)
T25	1208	<i>Lobatae</i>	1	(2%)	0.79 (1.5%)
		<i>Quercus</i>	26.5	(51.5%)	26.69 (51.9%)

Se calculó el promedio de carbono almacenado en coníferas y *Quercus* obteniendo los siguientes valores de carbono por hectárea para ambos modelos (Cuadro 16).

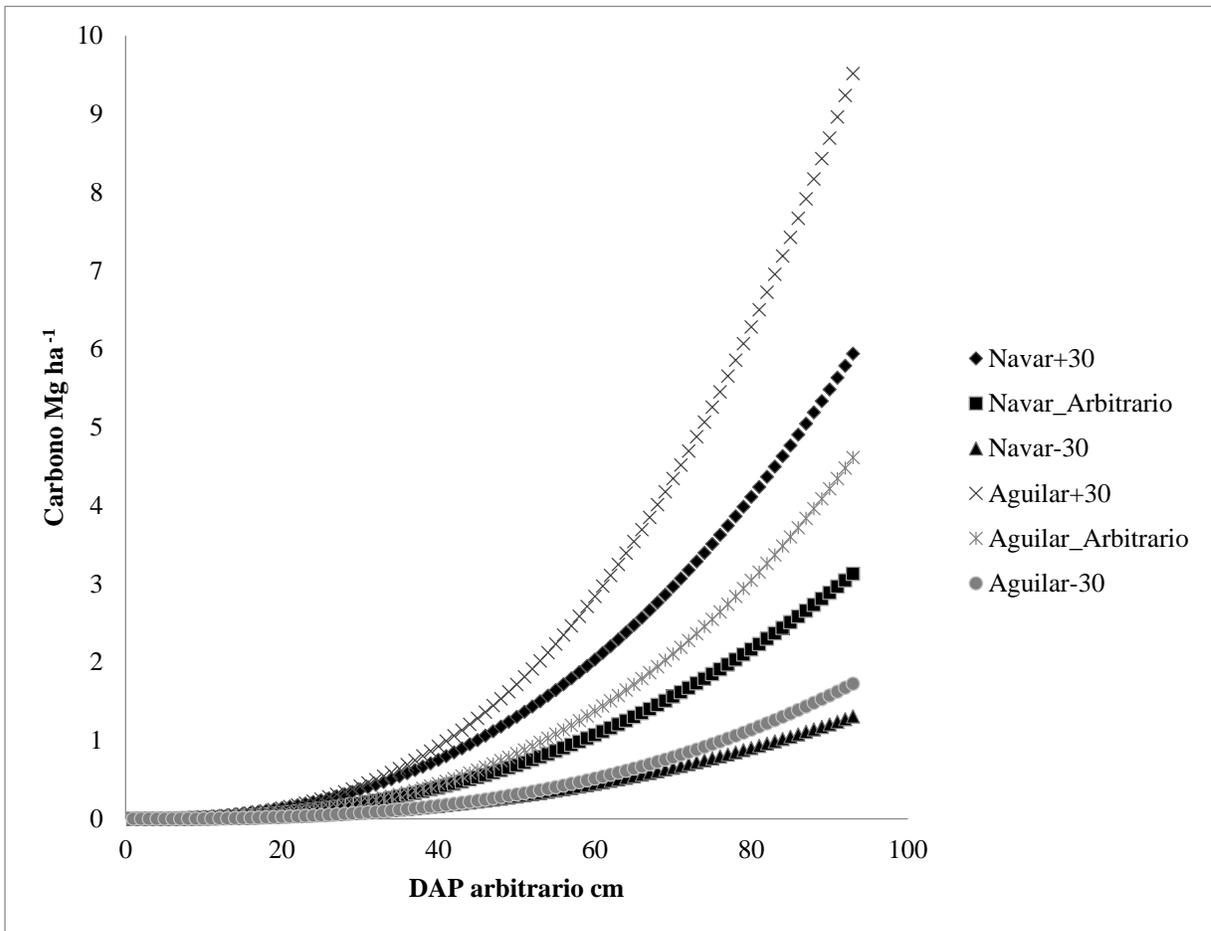
**Cuadro 16.** Promedio de carbono por individuo de acuerdo a la fórmula alométrica en la zona de estudio.

Familias	Navar (2009) Carbono Mg C ha <sup>-1</sup>	Aguilar et al. (2012) Carbono Mg C ha <sup>-1</sup>
<i>Quercus</i>	0.72 (±2.00) *	0.79 (±2.67) *
Coníferas	1.22 (±2.30) *	ND

Notas  
\*Desviación Estándar ND=No disponible

Los resultados de la prueba de sensibilidad para los DAP arbitrarios a partir de los valores obtenidos, con las dos fórmulas alométricas para encinos presentaron los siguientes resultados (Figura 14):

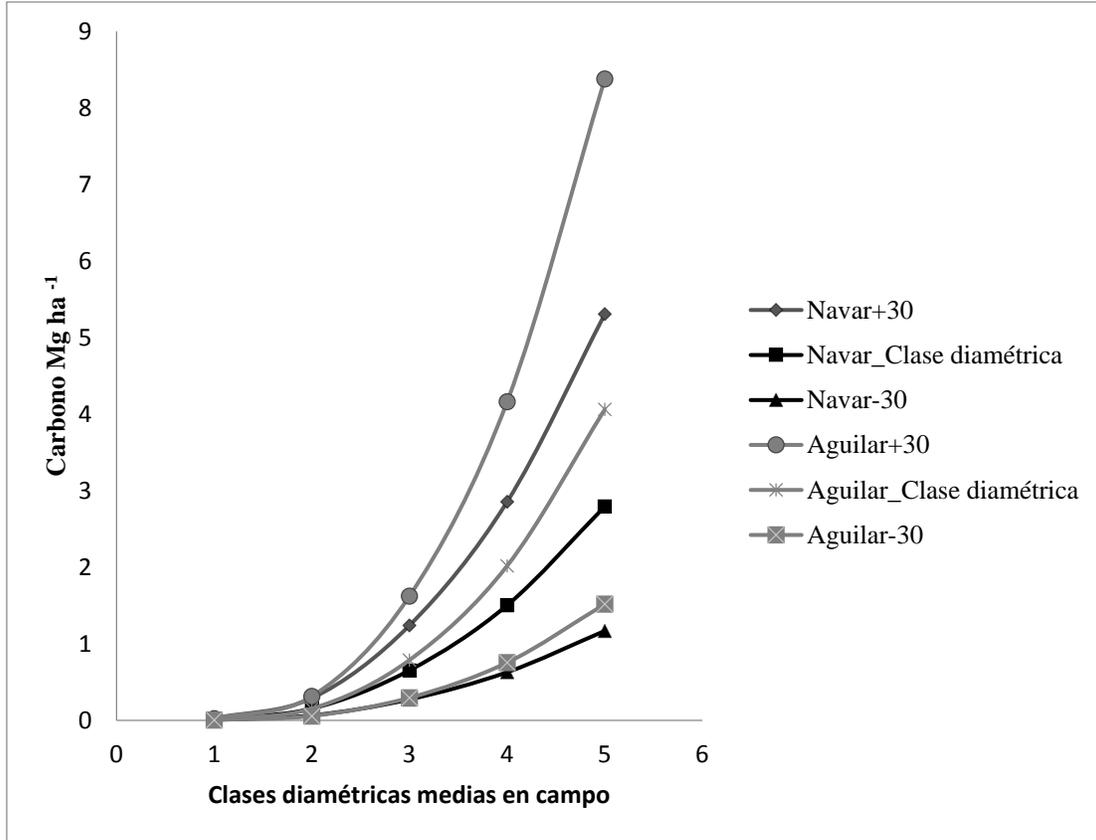
- Se aprecia que los resultados de la ecuación de Aguilar et al. (2012) fueron más altos que los estimados por la ecuación de Navar (2009). No obstante, los DAP arbitrario y las variaciones de -30% y +30% se mantuvieron en ambos grupos de fórmulas con tendencias similares y no se apreciaron diferencias al interior de cada grupo. Los diámetros menores a 40 cm obtuvieron valores de carbono con estimaciones muy similares en ambas ecuaciones para la familia Fagaceae.
- Se puede apreciar que las estimaciones obtenidas por ambos grupos de fórmulas incrementan de manera notable a partir de los 50 cm de DAP.
- Las estimaciones base para cada una de las ecuaciones siguieron una tendencia muy semejante.
- Las estimaciones obtenidas con el +30% de Aguilar et al. (2012) son mucho mayores que las estimaciones de +30% de Navar (2009).
- Las estimaciones de -30% para ambos grupos de ecuaciones fueron muy semejantes.



**Figura 14.** Prueba de sensibilidad de DAP arbitrario entre ecuaciones de Navar (2009) y Aguilar et al (2012).

Por su parte, la prueba de sensibilidad para las estimaciones de carbono obtenidas para cada transecto mediante las dos fórmulas alométricas (G1 y G2), usando los DAP promedio medidos en campo, por clase diamétrica, presentaron los siguientes resultados (Figura 15):

- La clase diamétrica 1, 2 y 3 no presentaron grandes diferencias en la estimación de carbono en ambos grupos.
- Se apreció que la clase 4 y 5 presentaron diferencias muy marcadas, siendo más elevadas las estimaciones de carbono con la fórmula de Aguilar et al. (2012).
- Los valores de -30% se mantuvieron muy cercanos en ambos grupos sin presentar diferencias notables.



**Figura 15.** Prueba de sensibilidad de carbono en cada transecto por categoría diamétrica entre ecuaciones de Navar (2009) y Aguilar et al (2012).

## Discusión

### Contenidos de carbono almacenados en la biomasa arbórea y los suelos para las Serranías Occidentales de Jalisco

Este estudio cumplió con el objetivo de estimar la cantidad de carbono en los dos principales almacenes en los bosques templados de las Serranías Occidentales de Jalisco. La zona de estudio puede ser considerada como un almacén de carbono intermedio (con respecto a los estudios contenidos en la Cuadro 1), debido a que, la cantidad de carbono almacenado supera a las cantidades almacenadas en otros sitios templados. En la zona de estudio destacan las zonas altas con clima  $Cw_2$  (clima templado subhúmedo), con vegetación de *BPAQ* y *BMM*, donde el carbono almacenado en la biomasa arbórea tuvo valores entre  $105.8 - 176.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (G1) y  $111.8 - 202.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (G2). Estos valores de carbono están en el rango de valores promedio reportados en otros estudios para bosques templados (Franco 2005; Ordóñez et al. 2008; Rodríguez-Laguna et al. 2009; Pérez-Ramírez 2009, Mendoza-Ponce y Galicia 2010; Tyrell et al 2012, Khaine y Woo 2015). Las cantidades de carbono en biomasa arbórea encontradas en zonas de baja montaña con clima  $Aw_2(w)_i$  (cálido subhúmedo) se encuentran en un rango de  $19.5 - 32.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , para ambos grupos alométricos, que corresponde a *BPQ*, *BTPQ*, *BTQ*, *BQP*. Estos valores son inferiores a los valores reportados en otros estudios de bosques templados, lo cual puede estar asociado a actividades humanas que han sucedido a lo largo del tiempo, como el manejo forestal o la extracción de individuos para leña y para hacer postes.

Además, se cumplió con el objetivo de estimar el almacén de carbono en los suelos. Los valores obtenidos de carbono en los suelos a 20 cm de profundidad coinciden con lo reportado por Ordóñez et al. (2008) en sitios perturbados y conservados para bosques templados, de pino y encinares de Michoacán, cuyas muestras fueron tomadas a profundidades entre 5 y 15 cm, así como los reportados por Saynez (2012) en Ixtlán de Juárez (Oaxaca), Perote (Veracruz) e Hidalgo en profundidades entre 10 y 15 cm.

Los suelos de la zona son de tipo regosol que se caracterizan por ser escasamente desarrollados, con bajos contenidos de arcilla y con bajas concentraciones de materia orgánica y, por ende, bajas concentraciones de carbono orgánico (Siebe et al. 2003). Estos

suelos presentan muchas rocas en proceso de meteorización por lo que su densidad, en el área de estudio, se encuentra por debajo de los valores que se reportan como regulares por Flores y Alcalá (2010).

Es importante señalar que la profundidad y la densidad aparente del suelo son factores que matemáticamente influyen de manera importante en los resultados de estimación de carbono en el suelo por unidad de área (Acosta et al. 2001). Por esta razón, la cantidad de carbono total en suelos aumentará si se incrementa la profundidad del muestreo. Sin embargo, los primeros 30 cm de suelo son muy importantes debido a que, a esta profundidad, es posible realizar comparaciones con otros estudios acerca del carbono en biomasa radical (Acosta et al. 2001). A esta profundidad es común encontrar el horizonte A del suelo, el cual se caracteriza por ser fácil de muestrear y porque la roca madre se encuentra en desintegración total, justo debajo de donde ocurre la descomposición de la materia orgánica, por lo que tiene una acumulación de materia orgánica humificada estrechamente mezclada con la fracción mineral (Vargas-Rojas 2009).

#### *Almacén de carbono en la biomasa arbórea y los suelos en relación con el gradiente ambiental*

Es importante señalar que el almacén de carbono en la biomasa arbórea está relacionado a factores climáticos como la precipitación y la temperatura (agrupados en el índice de aridez de este estudio) (Heimann y Reichstein 2008; Jump et al. 2009; Khaine y Woo 2015), por lo que, la cantidad actual de carbono almacenado dependerá de que no haya cambios drásticos en los regímenes térmicos y de humedad presentes en la zona. Sin embargo, los escenarios futuros de cambio climático predicen una disminución de las precipitaciones y un aumento en las temperaturas (Jump et al. 2009).

La relación entre IA y carbono en la biomasa arbórea, indica que sitios con mayor cantidad de agua disponible generan mayor cantidad de biomasa (Campo et al. 2016), por ende, estos sitios almacenan mayor cantidad de carbono, por ejemplo, el transecto T21 almacena la mayor cantidad de carbono y tiene un IA de 1.83, por lo que se considera un sitio de mayor humedad. Además, se puede ejemplificar que sitios con menor disponibilidad de agua tienden a almacenar menor cantidad de carbono, como en los transectos T1, T5 y T25

en donde el IA es de 1.07, 0.99 y 0.80, respectivamente. Es posible que en estos transectos el bajo almacén de carbono pueda ser explicado también por una disminución de la actividad fotosintética causada por la falta de agua (Chapin et al. 2011).

Por otra parte, el carbono en la biomasa arbórea también es sensible a aumentos en la temperatura, esto se debe principalmente a que el aumento de la temperatura incrementa la evapotranspiración y, por ende, disminuye la actividad fotosintética (Magnani et al. 2007; Heimann y Reichstein 2008; Chapin et al. 2011) provocando una disminución en el almacén de carbono. En este contexto, la mayor cantidad de carbono almacenado en biomasa arbórea se encuentra a una temperatura promedio anual de 11.6 ° C, mientras que la menor cantidad de carbono se encuentra en áreas con temperaturas promedio anual de 19.75 °C.

Por último, la relación del carbono en biomasa arbórea y la altitud es importante, ya que se identificó un incremento en la cantidad de carbono almacenado a mayor altitud. Esta relación podría explicarse por el manejo antrópico (Givnish 1998; Alves et al. 2010) y por la estructura y composición de especies del bosque ya que en algunos estudios se ha identificado que la elevación está asociada a un incremento en las tasas de crecimiento de los árboles, la estructura de soporte y su área basal, en este estudio debido a la reducción de las temperaturas (Givnish 1998; Körner 2007; Culmsee et al. 2010; Unger y Leuschner 2012). Por esta razón, sería recomendable realizar análisis acerca la influencia de la altitud con la productividad primaria neta.

Por su parte, la cantidad de carbono total en los suelos no está determinada únicamente por el tipo de suelo o la profundidad de muestreo, sino también por la temperatura y la precipitación (Robert 2002; Davidson y Janssens 2006; Chapin et al 2011; Price et al. 2012; Saines 2012).

En este estudio no se evaluó el efecto de la precipitación y temperatura de manera independiente, sino que se evaluó el efecto del índice de aridez en los almacenes de carbono en suelo, el cual puede considerarse una variable compuesta, la cual integra variables como la precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, etcétera. De manera general, se identificó que en los sitios con clima Cw<sub>2</sub> (clima templado subhúmedo) (de menor temperatura y mayor precipitación) es donde los almacenes el carbono total en el

suelo son mayores; debido a que en bajas temperaturas, los suelos disminuyen su respiración, y a mayor precipitación se acelera la descomposición de la materia orgánica, por lo tanto hay mayor entrada de carbono al suelo (Robert 2002; Davidson y Janssens 2006; Chapin et al. 2011; Orellana-Rivadeneira et al. 2012; Price et al. 2012; Saines 2012). En las regiones templadas subhúmedas del área de estudio se presentan cambios en la precipitación a lo largo del año, permitiendo tener periodos de gran disponibilidad de materia orgánica en descomposición, seguidos de periodos donde esta materia es asimilada de forma lenta.

Los sitios de menor carbono total en los suelos son los sitios más secos (0.8 a 1.4 en el IA) y de menor altitud, ya que en estas áreas no hay mucha agua disponible, promoviendo que la descomposición de la materia orgánica sea lenta y consecutivamente, el carbono se almacena en el mantillo por más tiempo (Davidson y Janssens 2006; Saynes 2012).

Los valores obtenidos para el índice de Shannon-Wiener (1949) son más bajos que lo esperado en los intervalos de Margalef (1972 citado por Magurran 2004), quien menciona que los valores del índice obtenidos a partir de datos empíricos usualmente caen entre 1.5 y 3.5 y raramente sobrepasan el 4, debido a que se requieren grandes cantidades de datos para sobrepasar el valor 4. Los resultados de diversidad muestran una tendencia inversa con los identificados para la Sierra de Manantlán, en Jalisco (Givnish, 1998), en la Sierra Madre del Sur, Oaxaca (Salas-Morales y Meave 2012), en la Sierra Nevada del Estado de México (Sánchez-Gonzales y Lopez-Mata 2005) y en Veracruz (Toledo y Williams 2014). Sin embargo, en este estudio la diversidad de especies no está relacionada con un mayor almacén de carbono en biomasa o en suelo.

### *Relación entre el carbono en la biomasa arbórea y los suelos*

Este trabajo cumplió con el objetivo de evaluar la relación existente entre los dos almacenes de carbono. La cantidad de carbono estimada en suelo y biomasa arbórea tuvo una relación positiva significativa a lo largo del gradiente. Aunque la variación explicada es baja, se infiere que estos dos almacenes interactúan entre sí, ya que en ambos influyen factores en común, por lo que, si uno de los almacenes sufre alguna perturbación o alteración, ya sea por causas antropogénicas o de cambio climático, esta impactaría en el otro almacén

(Robert 2002; Chapin et al. 2011; Guerrero-Ortiz et al. 2012; Price et al. 2012). Debido a esto es imperante preservar ambos reservorios para aminorar los efectos del cambio climático.

### Carbono en coníferas y encinos

Las especies de coníferas y de la familia Fagaceae, tienen una gran cantidad de individuos con DAP promedio de clase 1 (0-20 cm de DAP), por lo que potencialmente, a lo largo de su desarrollo, pueden contener cantidades mucho mayores de biomasa (Rodríguez-Laguna et al. 2009). La distribución de individuos de estos dos grupos tiene una distribución heterogénea a lo largo del gradiente altitudinal, encontrando las especies de mayor DAP a mayor altitud; Givnish (1998) encontró una distribución similar a la encontrada en este estudio y dio como explicación a sus resultados los efectos del manejo antrópico que se dan con mayor frecuencia en zonas bajas que altas debido a la dificultad para acceder a zonas más altas. Por estas razones, se considera que un manejo forestal adecuado permitiría que las especies de menor DAP, ubicadas en zonas bajas, logren aumentar su almacén de carbono a lo largo del tiempo (Anexo 1).

Los pinos son el grupo de especies que mayor cantidad de carbono almacenan. Las especies de coníferas pueden llegar a tener grandes diámetros, pudiendo alcanzar hasta 81.5 cm de DAP en algunas especies (en orden descendente de importancia): *P. herrerae*, *P. maximinoi*, *P. jaliscana*, *P. oocarpa*, *P. douglasiana*, *Abies* sp. y *Pinus ayacahuite*. Se distingue la importancia en el almacén de carbono en la biomasa arbórea de una especie endémica al área: *P. jaliscana*.

Así mismo, se identificó que algunas especies de coníferas incrementan notablemente su almacén de carbono en la biomasa debido a factores como la altitud, la humedad y la precipitación (Musule et al. 2018), encontrando mayor cantidad de carbono a mayor altitud y humedad con menor temperatura, siendo estas zonas importantes para la conservación de los bosques.

Los encinos son el segundo grupo de especies que mayor cantidad de carbono almacenan en la zona. Los encinos que tiene un DAP promedio alrededor de 14 cm, en ambas secciones, llegando a alcanzar diámetros de hasta 88.8 cm en la sección *Lobatae*, o bien, hasta los 66.8 cm para la sección *Quercus*. Las especies de *Quercus* que pueden llegar a tener mayores diámetros (en orden descendente), son: *Q. scytophylla*, *Q. laurina*, *Q. resinosa*, *Q. magnoliifolia*, *Q. iltisi*, *Q. tuitensis* y *Q. obtusata*. *Q. tuitensis*, de la sección *Lobatae*, la cual es endémica de la zona es la especie con el mayor almacén de carbono en biomasa arbórea. Las especies de la sección *Lobatae* (*Q. scytophylla*, *Q. crassifolia*, *Q. castanea* y *Q. eduardii*) son más abundantes en las zonas húmedas que los de la sección *Quercus* (*Q. magnoliifolia* y *Q. obtusata*). El incremento de los almacenes de carbono se explica porque los encinos alcanzan grandes DAP en zonas húmedas, particularmente los encinos rojos, provocando un aumento en la talla y dominancia de individuos de la familia Fagaceae (Givnish 1998; Culmsee et al. 2010).

En general, se podría generar un plan de manejo forestal sustentable en las zonas de menor altitud y mayor aridez en la zona de estudio que permita el incremento del DAP para las especies de las 17 familias vegetales. (Klooster y Masera 2000; Ordóñez et al. 2001; Kanninen 2003; Pan et al. 2011; Torres-Rojo et al. 2016). El plan de manejo integral garantizaría que los individuos que actualmente pertenecen a la clase diamétrica 1 crezcan a través de tiempo hasta alcanzar otras clases mayores. El plan de manejo forestal sustentable debe contar con estrategias de acción que, por una parte, consideren el incremento en el reclutamiento y proponga mejoras en la regeneración de las poblaciones de pinos y encinos (Ajbilou et al. 2003), y, por otra parte, que ayuden a evitar procesos de deforestación, desertificación y degradación de estos bosques (Kanninen 2003). También se debe de contar con un plan eficiente de control de incendios para asegurar la supervivencia de los individuos más jóvenes (Khaine y Woo 2015).

#### Alometría y análisis de sensibilidad

Mediante el uso del análisis de sensibilidad, fue posible ver el efecto de la selección de la ecuación usada para obtener la biomasa. Con un efecto muy fuerte en nuestras estimaciones de biomasa en individuos cuyo diámetro era muy grande, con diferencias muy grandes entre ambas ecuaciones. No se esperan variaciones en la estimación de biomasa si se

utilizan diámetros dentro del rango diamétrico que se uso para construir el modelo alométrico.

En los análisis de sensibilidad, se identificó que las estimaciones de carbono en encinos, obtenidas con las dos ecuaciones alométricas, tienen resultados semejantes hasta DAP alrededor de 30 - 40 cm. Un efecto muy fuerte en nuestras estimaciones de carbono en biomasa arbórea fue encontrado en individuos cuyo diámetro estaba fuera del rango de DAP que fue usado para construir el modelo alométrico. La fórmula empleada por Navar (2009) fue aplicada para un rango de diámetros de 7.3 a 62.5 cm (Navar 2009), mientras que, la fórmula de Aguilar et al. (2012) se utilizó para un rango de diámetros de 3.8 a 26.6 cm (Aguilar et al. 2012). Por estas razones, se puede explicar que a partir de los 40 cm de DAP la ecuación de Aguilar et al. (2012) tiende a calcular valores más altos de carbono. Es importante mencionar, que a pesar de que ambas fórmulas son utilizadas para encinos, estas son distintas en la forma y comportamiento de los valores que arrojan. Este resultado se puede atribuir a que la ecuación alométrica para encinos planteada por Navar (2009) se construyó usando la densidad de la madera y el diámetro a la altura del pecho como parámetros, por lo que puede considerarse a este modelo alométrico con un mejor ajuste para las estimaciones de carbono (Navar 2010; Chave et al. 2014). Por otra parte, resulta importante identificar el tipo de manejo en que se encuentra la vegetación con la que se desarrollaron las fórmulas alométricas, debido a que el manejo influye en la arquitectura de los individuos arbóreos (Sáenz et al. 2010) y, por lo tanto, las estimaciones de carbono serán distintas.

## Conclusiones

Los contenidos de carbono en los principales almacenes (biomasa arbórea y suelo) de los bosques de las Serranías Occidentales de Jalisco están determinados por el gradiente altitudinal y sobre todo por la aridez, el cual establece una relación entre la precipitación y temperatura. De esta manera, se cumple con la hipótesis de trabajo.

Las especies de coníferas tienen una mayor contribución en los contenidos de carbono a nivel ecosistémico. Estos últimos, son seguidos por los encinos, los cuales representan un tercio del almacén de carbono en biomasa arbórea de la zona de estudio. Los encinos de la sección *Lobatae* tienen mayores contenidos de carbono que aquellos de la sección *Quercus*. Así mismo, los encinos de la sección *Lobatae* son más diversos y tienen mayor número de especies endémicas en la zona de estudio.

Los suelos de estas Serranías son caracterizados por ser someros y con un bajo desarrollo, por lo que la cantidad de carbono disminuye debido a la gran cantidad de grabas y lajas en proceso de meteorización impidiendo la retención de mayor cantidad de carbono en el suelo.

Los almacenes de carbono en biomasa arbórea y suelos de las Serranías Occidentales de Jalisco son importantes, por lo que deben ser protegidos y promovidos a través de un plan de manejo forestal sustentable o una política de protección ambiental.

## Recomendaciones

Los resultados de esta tesis sirven como un antecedente de los estudios de almacén de carbono en el occidente de Jalisco. Esta tesis es un insumo importante para el desarrollo de proyectos sobre almacenes de carbono de mayor amplitud como son las propuestas REDD+; la cual propone la reducción de emisiones de GEI por deforestación y degradación, además de contribuir a la conservación, manejo sostenible de los bosques y aumento de los almacenes de carbono. O bien, sirvan como referencia para generar proyectos dentro de la norma mexicana para el registro de proyectos forestales de carbono y la certificación del incremento en el acervo de carbono.

Se recomienda hacer estudios sobre el carbono almacenado en el mantillo de los sitios más secos, tanto en época de lluvias como en época de secas, debido a que la tasa de descomposición de la materia orgánica se reduce por condiciones de sequía y aridez.

Se requiere generar nuevos modelos alométricos que incorporen la densidad de la madera y la fracción de carbono contenido en la biomasa para cada una de las especies de coníferas y encinos en el estado de Jalisco y, en particular, para las Serranías Occidentales con la finalidad de obtener estimaciones de carbono con menor incertidumbre. Además, se requiere realizar estudios acerca de la cantidad de carbono que conforma la biomasa de pinos y encinos en la zona.

## Bibliografía

- Acosta, M., Etchevers, J., Monreal, C., Quednow, K., y Hidalgo, C. (2001). Un método para la medición de carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. En Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Pp. 15.
- Aguilar R. Ghilardi A. Vega E. Skutsch M. y Oyama K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass Bioenergy* 36: 192–207
- Ajbilou, R., Marañón, T., y Arroyo, J. (2003). Distribución de clases diamétricas y conservación de bosques en el norte de Marruecos. *Investigación Agraria, Sistemas de Recursos Forestales*. 12: 111-123.
- Álvarez, S., y Rubio, A. (2016). Wood Use and Forest Management for Carbon Sequestration in Community Forestry in Sierra Juarez, Mexico. *Small-scale Forestry* 15: 357-374.
- Alves, L. F., Simone, A. V., Scaranello, M. A., Plinio, B. C., Flavio, A. M. S., Jolyd, C. A. y Martinelli, L. A., (2010). Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *Forest Ecology and Management* 260: 679–691.
- Arenas-Navarro, M., Torres, C.A., Téllez, O., García, F., Oyama, K., (En preparación). Ensamble Morfofuncional de Encinos en un Centro de Diversificación en México. Manuscrito no publicado. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Balderas Torres, A., y Lovett, J. C. (2012). Using basal area to estimate aboveground carbon stocks in forests: La Primavera Biosphere's Reserve, Mexico. *Forestry* 86: 267-281.
- Baroody, J. J. (2013). Firewood Extraction as a Catalyst of Pine-Oak Forest Degradation in the Highlands of Chiapas, Mexico. Master of Science. University of Washington. 109 p.
- Bolaños-González Y., Bolaños-González M. A.; Paz-Pellat F.; Wong-González J. y Barrales-Brito E. (2015). Estimación de carbono almacenado en dos bosques de referencia del Monte Tláloc en Texcoco, Estado de México. En: Paz, F., J. Wong y R. Torres (Editors). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. ISBN: 978-607-96490-3-6, Pp. 292-299.
- Camou-Guerrero, A., Ghilardi, A., Mwampamba, T., Serrano, M., Ortiz., A., T., Vega, E., Oyama, K., y Maser, O., (2014) Análisis de la producción de carbón

vegetal en la Sección: Investigación Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México: implicaciones para una producción sustentable. *Investigación ambiental* 6: 127-138.

- Campo, J., García Oliva, F., Navarrete Segueda, A., y Siebe, C., (2016). Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoamericana* 34: 31-38.
- Chapin F.S., Matson P.A., y Vitousek P.M. (2011) *Plant Carbon Budgets*. In: *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York, NY
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., y Henry, M. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20: 3177-3190.
- Chávez-Vergara B. (2015). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada a dos especies de *Quercus* sobre la descomposición del mantillo en un bosque templado deducido. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 171p.
- CONAFOR. (2017). *Estrategia Nacional REDD+*. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), México. Pp. 124.
- Cuervo-Robayo, A., Telléz-Váldes, O., Gómez, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez J. F. y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for México. *International Journal of Climatology* 34: 2427–2437.
- Cuevas, G., González G. J. G., Hernández L. L., Iñiguez D. I., Jardel P. E., Rodríguez M. P. y Santiago P. A. L., (2010). Sierra Madre del Sur y Franja Neovolcánica de Jalisco En: *El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F., México. Pp 197.
- Culmsee, H., Leuschner, C., Moser, G., y Pitopang, R. (2010). Forest aboveground biomass along an elevational transect in Sulawesi, Indonesia, and the role of Fagaceae in tropical montane rain forests. *Journal of Biogeography*, 37: 960-974.
- Davidson, E. A., y Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440: 165-73
- Delignette-Muller, M. L. y C. Dutang. (2015). *Fitdistrplus: an R package for fitting distributions*. *Journal of Statistical Software* 64: 1–34
- FAO, (2018). *La FAO, Los Bosques y el Cambio Climático*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. Pp. 20.
- Flores D. L y Alcalá M. J. R. (2010) *Manual de Procedimientos Analíticos*. Laboratorio de Física de Suelos Departamento de Edafología. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. 56 p.
- Franco S. (2005). Estimación de Captura de Carbono en el Estrato Arbóreo del Parque Nacional Nevado de Toluca. Reporte Técnico CONACYT. Ref.: 37022-V. México.

- Galicia, L., A. M. Gamboa Cáceres, S., Cram, B., Chávez Vergara, V., Peña Ramírez, V., Saynes y C. Siebe. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Gernandt, D. S., y Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85: 126-133.
- Guerrero-Ortiz, P., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G., y Sánchez-Colín, M. (2012). Respiración de CO<sub>2</sub> como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de *Lupinus*. *Terra Latinoamericana*, 30: 355-362.
- Givnish, T. J. (1998). Altitudinal gradients in tropical forest composition, structure, and diversity in the Sierra de Manantlán. *Journal of Ecology* 86: 999-1020.
- Gómez, G. E. y Pérez, R. F., (2015). Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque (Valdivia)* 36: 255-264.
- Gower, J. C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 27: 857-871
- Guevara M., Vargas R., Arroyo C., Equihua J., Cruz C.; Etchevers J., Paz F., Brunzell N., Hayes D. Y de Jong B. (2016). Inferencia espacial de la concentración de carbono orgánico en los suelos de México. En: Paz, F. y R. Torres (editores). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-96490-4-3. 732 p.*
- Heimann, M., y Reichstein, M. (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 451: 289.
- INECC, (2017). Estudio de ordenamiento ecológico de la región de Puerto Vallarta-el Tuito Costa Alegre, Jalisco, Clasificación, AE 010341. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Consultado 25/10/2017 en : [0](#)
- INEGI, (2001). Estudio hidrológico del estado de Jalisco. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), segunda edición, México, D.F., México.
- INEGI, (2001). Carta fisiográfica escala 1:1 000 000 Serie I. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), México, D.F., México.
- INEGI, (2005). Anuario Estadístico Jalisco Tomo 1. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), México, D.F., México. Pp. 28.
- INEGI, (2007). Conjunto de datos vectorial edafológica escala 1:250 000 Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México.

- INEGI (2014). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie V / Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México. Pp 195.
- INEGI (2016). Carta Topográfica del Estado de Jalisco escala 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México.
- IPCC (1994). The Supplementary Report to the ipcc (Intergovernmental Panel on Climate Change) Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC, (2014): Climate Change (2014). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jardel, P., E., J., (2015). Guía para la caracterización y clasificación de hábitats forestales. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), México. Pp. 118.
- de Jong BHJ., Cairns M, Haggerty P., Ramírez-Marcial N., Ochoa-Gaono S., Mendoza-Vega J., González-Espinosa M., y March-Mifsut L., (1999) Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in the central highlands of Chiapas, México. *Environmental Management* 23: 373–1285.
- Khaine, I. Y Woo S.Y., (2015). An overview of interrelationship between climate change and forests, *Forest Science and Technology* 11: 11-18.
- Köppen, W., (1948). *Climatología*. Buenos Aires: Panamericana. Pp 496.
- Jump A. S., Mátyás C. y Peñuelas J., (2009). The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. School of Biological and Environmental Sciences, University of Stirling, Stirling, FK9 4LA, UK. Unitat d'Ecofisiologia i Canvi Global CSIC-CEAB-CREAF, CREAF (Centre de Recerca Ecològica Aplicacions Forestals), Edifici C, Campus de Bellaterra (UAB), 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain. Institute of Environmental and Earth Sciences, Faculty of Forestry, University of West Hungary, 9401 Sopron Pf. 132, Hungary. *Trends in Ecology and Evolution* 24: 694-701.
- Kanninen M., (2003). Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. FAO, ROMA 2003. Pp. 99 Disponible en línea: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y4435s/y4435s00.pdf>
- Klooster, D., y Masera O., (2000) Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change* 4: 259-272.
- Körner C. (2007), The use of 'altitude' in ecological research, Institute of Botany, University of Basel, Schönbeinstrasse 6, Basel, CH-4056, Switzerland. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 569-574.

- Magnani, F., Mencuccini, M., Borghetti, M., Berbigier, P., Berninger, F., Delzon, S., y Kowalski, A. S. (2007). The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 447(7146), 849.
- Magurran, A. E., (2004). An index of diversity. *Measuring biological diversity*. Wiley-Blackwell. Oxford UK. Pp 264.
- McAlece, N., Gage, J.D.G., Lambhead, P.J.D., y Paterson, G.L.J., (1997) BioDiversity Professional statistics analysis software. Jointly developed by the Scottish Association for Marine Science and the Natural History Museum London.
- Mendoza-Ponce, A., y Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83: 497-506.
- Millard, S. P. (2013). *EnvStats: an R package for environmental statistics*. Springer Science & Business Media. Pp. 305.
- Molina, M. F., y Farinós, H. B. M. (2012). Los componentes alfa, beta y gamma de la biodiversidad. Aplicación al estudio de comunidades vegetales. Universidad Politécnica de Valencia. Pp 10.
- Musule, R., Acuña, E., Osorio, L. R. H., Domínguez, Z., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. R., y Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Growing up at Different Altitudes: Changes in Energy Content of the *Abies religiosa* Wood. *BioEnergy Research*, 11: 209-218.
- NASA (The National Aeronautics and Space Administration). (2017). Surface meteorology and Solar Energy: A renewable energy resource web site (release 6.0). <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETSscreen/> accesado 12 enero 2018
- Návar, J. 2009 Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427–434.
- Návar, J. (2010). Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: a literature review and the challenges ahead. *Biomass*. Sciyo, Croatia, 27-64.
- Nieves-Hernández, G., Vázquez-García, J. A., Vargas-Rodríguez, Y., L., Vázquez-García, M., y González-Gallegos, J. (2009). Small-scale environmental gradients in a pine-oak forest community in Nueva Colonia, Mezquitic, Jalisco, Mexico. *Polibotánica* 27: 31-52.
- Nixon, K.C., (1993). El género *Quercus* en México. En: Ramamoorthy, T.P., Bye, R., Lot, A., Fa, J. (Eds.), *Diversidad Biológica de México. Orígenes y Distribución*. Instituto de Biología, UNAM, México.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. México 30 de diciembre de 2010.

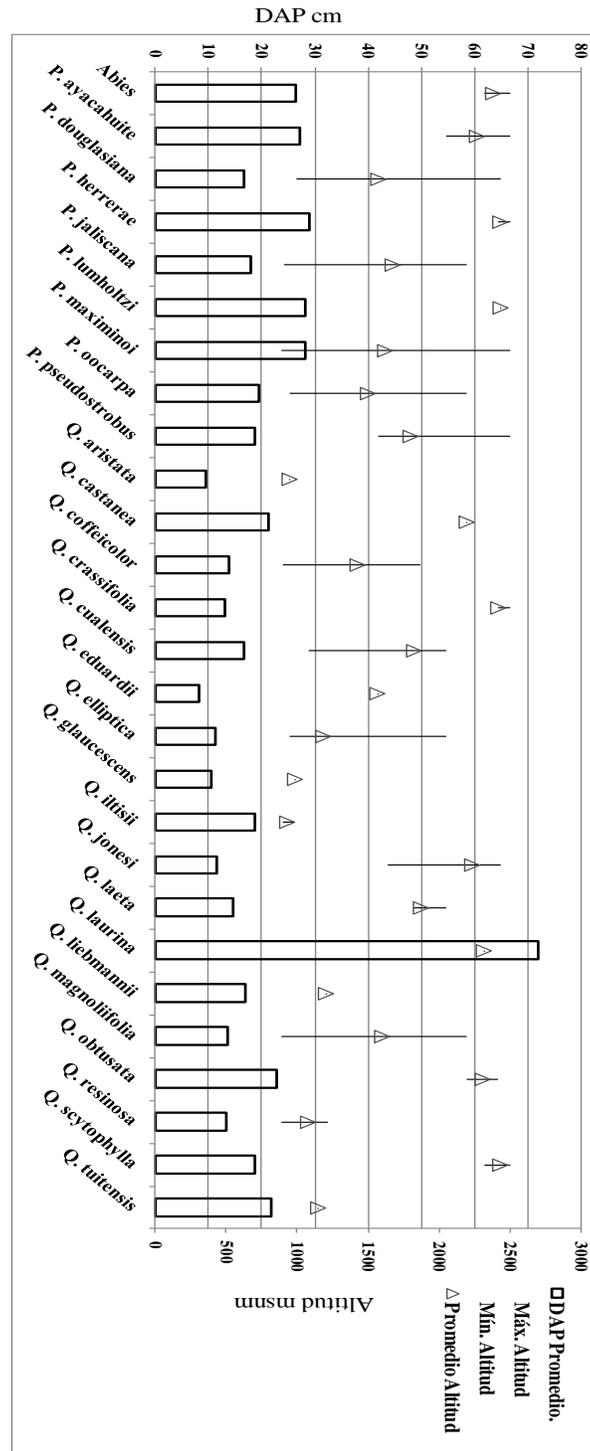
- Ordóñez, J., de Jong, B., y Masera O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7: 27-47.
- Ordóñez J,A,B, de Jong BHJ, Garcia-Oliva F, Avina FL, Perez JV, Guerrero G, Martinez R y Masera O (2008) Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the central highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255: 2074-2084.
- Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval-Solís, M., L., Linares-Fleites, G., García-Calderón, N., E., Tamariz-Flores, J., V. (2012). Descripción de la dinámica del carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. Pp. 14.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., y Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 1201609.
- Penman, J. (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme and Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan.
- Pérez-Ramírez, S. (2009), Los reservorios de carbono en los bosques de San Juan Xoconusco, Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. Tesis de maestría. CIGA-UNAM. Pp 101.
- Price S.P., Bradford M.A., y Ashton M.S. (2012) Characterizing Organic Carbon Stocks and Flows in Forest Soils. In: Ashton M., Tyrrell M., Spalding D., Gentry B. (eds) *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*. Springer, Dordrecht.
- QGIS Development Team. (2016). QGIS Geographic Information System Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Reich, R. M., Aguirre-Bravo, C., y Bravo, V. A., (2008). New approach for modeling climatic data with applications in modeling tree species distributions in the states of Jalisco and Colima, Mexico. *Journal of Arid Environments* 72: 1343-1357.
- Reich, R. M., Aguirre-Bravo, C., Bravo, V. A., y Briseño, M. M. (2011). Empirical evaluation of confidence and prediction intervals for spatial models of forest structure in Jalisco, Mexico. *Journal of Forestry Research*, 22: 159-166.
- Reich, R. M., y Aguirre-Bravo, C. (2009). Small-area estimation of forest stand structure in Jalisco, Mexico. *Journal of Forestry Research*, 20: 285-292.
- Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra (Vol. 96). Food & Agriculture Org.
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, Ó.A., Treviño-Garza, E.J. y Razo Zárate, R.. (2009). Estimación de Carbono almacenado en el bosque de

pino-encino en la reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*. 5: 317-327.

- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendí, P., y Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72: 835-864
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana*. 14: 3-21.
- Rzedowski, J., (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, Pp 504.
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14: 107-120.
- Sáenz, R. J. T.; Villaseñor R. F. J.; Muñoz F. H. J.; Rueda S. A. y Prieto R. J. A. 2010. Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico Núm. 17. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 48 p.
- Salas-Morales S.H., y Meave J.A. (2012) Elevational patterns in the vascular flora of a highly diverse region in southern Mexico. *Plant Ecology* 213: 1209–1220
- Sánchez-González A. y Lopez-Mata L (2005) Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico. *Diversity Distributions* 11: 567–575
- Saynes, S. V. (2012). Secuestro de carbono en el suelo de bosques con aprovechamiento forestal en condiciones contrastantes de lluvia. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F. Pp 110.
- Segura, M., y Andrade Castañeda, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas* 46: 89-96
- Shannon, C.E. y Weaver. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. University Illinois Press, Urbana. Pp 55.
- Siebe, C., Bocco, G. Sánchez-Espinoza J. F. y Velázquez. A. (2003). Suelos: Distribución, características y potencial de uso. pp. 127-163. En: A. Velázquez, A. Torres y G. Bocco (editores). *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de los recursos naturales*. Instituto Nacional de Ecología, Dirección de Publicaciones. Mexico, D. F.
- SEMARNAT (2010). *Visión de México Sobre REDDD+ Hacia Una Estrategia Nacional*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. Pp 57.
- SEMARNAT (2012). *México Quinta Comunicación Nacional Ante La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. Pp 441.

- SEMARNAT (2016). Estrategia Nacional para REDD+ (para consulta pública). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México. Pp 107.
- Seppälä, R., y Buck, A. C. (2009). Adecuar los bosques al cambio climático: Una perspectiva global de los efectos del cambio climático sobre los bosques y las poblaciones y opiniones de adaptación al mismo. Ministerio de Relaciones Exteriores de Finlandia. Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal ISBN 978-3-901347-82-5 Impreso por ERWEKO 2009.
- Torres-Miranda A., Luna-Vega I. y Oyama K. (2011) Conservation biogeography of red oaks (*quercus*, section *lobatae*) in México and central America. *American Journal of Botany* 98: 290–305.
- Torres-Rojo, J.M., Moreno-Sánchez, R. y Mendoza-Briseño, M.A. (2016), Sustainable Forest Management in Mexico. *Curr Forestry Rep* 2: 93. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>
- Toledo-Garibaldi, M., y Williams-Linera, G. (2014). Tree diversity patterns in successive vegetation types along an elevation gradient in the Mountains of Eastern Mexico. *Ecological Research* 29: 1097-1104.
- Tyrrell L M., Ross J., y Kelty M. (2012). Carbon Dynamics in the Temperate Forest. En: Ashton, M. S., Tyrrell, M. L., Spalding, D., y Gentry, B. (editores). (2012). *Managing forest carbon in a changing climate*. Springer Science & Business Media.
- UNEP. (1997). United Nations Environment Programme. Middleton, N. y Thomas, D.S.G. *World atlas of desertification*. London; New York; Sídney; Oakland: Arnold: UNEP. Pp 180.
- Unger, M., Homeier, J., y Leuschner, C. (2012). Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes. *Oecologia* 170: 263-274.
- Valencia-A, S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75: 33–53
- Vargas-Rojas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos (No. CIDAB-S401. F7-V3g). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma
- Velázquez, R. O. A., Martínez, R. L. M. y Carrillo G. F. M. (2012). Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediante el sistema de Köppen, modificado por García, y técnicas de sistemas de información geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 79: 7-19.
- Zavala Chávez, F. (1998). Observaciones sobre la distribución de encinos en México. *Polibotánica*, (8): 47-64.

# Anexos



**Anexo 1.** Promedio, máximo y mínimo de la altitud y promedio del DAP de especies de coníferas y los *Quercus*.