



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
Manejo Integral de Ecosistemas

CRECIMIENTO, BIOMASA Y CARBONO ARBÓREO EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN  
BOSQUES TEMPLADOS DEL CENTRO DE MÉXICO

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:  
**ROSA ISELA JASSO FLORES**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO**  
**INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**

**COMITÉ TUTOR: DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM**  
**INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**  
**DRA. ANGELINA MARTÍNEZ YRIZAR**  
**INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM**

**MÉXICO, D.F. ENERO, 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
Manejo Integral de Ecosistemas

CRECIMIENTO, BIOMASA Y CARBONO ARBÓREO EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN  
BOSQUES TEMPLADOS DEL CENTRO DE MÉXICO

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:  
**ROSA ISELA JASSO FLORES**

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO**  
**INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**

**COMITÉ TUTOR: DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM**  
**INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**  
**DRA. ANGELINA MARTÍNEZ YRIZAR**  
**INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM**

**MÉXICO, D.F. ENERO, 2014**

Dr. Isidro Ávila Martínez  
Director General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión de subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 26 de agosto del presente, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** de la alumna **JASSO FLORES ROSA ISELA** con número de cuenta **300267622** con la tesis titulada **“CRECIMIENTO, BIOMASA Y CARBONO ARBÓREO EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN BOSQUES TEMPLADOS DEL CENTRO DE MÉXICO”**, realizada bajo la dirección del **DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO**:

**Presidente:** DR. VÍCTOR JOAQUÍN JARAMILLO LUQUE  
**Vocal:** DRA. MARÍA DEL PILAR ORTEGA LARROCEA  
**Secretario:** DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM  
**Suplente:** DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES  
**Suplente:** DRA. ANGELINA MARTÍNEZ YRIZAR

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**  
Cd. Universitaria, D.F., a 3 de diciembre de 2013.

*María del Coro Arizmendi Arriaga*

**DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA**  
**COORDINADORA DEL PROGRAMA**

c.c.p. Expediente de la interesada

## Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría en Ciencias Biológicas en este posgrado.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM (IN105712) "Respuesta del ciclo de carbono al cambio de uso de suelo y manejo forestal en paisajes de bosques templados" por el financiamiento brindado para la realización del proyecto. Asimismo por la beca otorgada para la conclusión de la escritura de la presente tesis.

A los apoyos económicos otorgados por el programa PAEP-UNA (2012) para la asistencia a cursos que optimizaron la elaboración del proyecto

A la UNAM por el apoyo que brindo a través del PAEP-UNA (2013) para el empastado de la tesis.

A las autoridades del Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan por las facilidades brindadas en la realización y término del proyecto.

Al personal del Taller de mecánica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM por la ayuda en la preparación de las muestras dendrocronológicas

A los miembros del Comité Tutorial, la Dra. Angelina Martínez Yrizar y el Dr. Lorenzo Vázquez Selem por su valiosa guía y sugerencias para que la tesis alcanzará claridad y calidad.

## Agradecimientos personales

Muy en especial a mi tutor el Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento por trabajar conmigo, apoyarme y motivarme a la conclusión de este proyecto.

A los miembros del jurado Dr. Víctor Joaquín Jaramillo Luque, Dra. María del Pilar Ortega Larrocea, Dr. Lorenzo Vázquez Selem, Dr. Homero Julio Eudes Campos Alves y Dra. Angelina Martínez Yrizar por sus comentarios y sugerencias hacia este trabajo.

*A mi padre Gilberto Jasso.*

*A mis madres Rosa y Martha Flores.*

*A mis hermanos Héctor Medel y Dulce Moreno.*



A mis amigos de siempre Diego, Juan Carlos y Ernesto.

A todos aquellos que me acompañaron a campo; Bruno, Edgar, Mary, Jorge, Kery, Ana, Laura, Gaby, Miguel, JC, Erick y Hugo gracias por su paciencia y entusiasmo, definitivamente fueron parte fundamental de este proyecto de vida.

A mis amigos y compañeros Faby, Lucero, Arturo, Mario, Nacho, Alma, Rak y Ely por hacerme feliz.

#### MAFALDA



## Contenido

1. Introducción		1
2. Marco Teórico	2.1. Bosques templados y México	3
	2.2. Ciclo del carbono y biomasa en bosques templados	5
	2.3. Factores abióticos y el crecimiento arbóreo	6
	2.4. Cuantificación de la biomasa arbórea viva sobre el suelo	9
	2.5. Crecimiento secundario arbóreo y dendrocronología	11
3. Planteamiento del problema y objetivos		15
4. Hipótesis		16
Referencias		18
<hr/>		
<b>Capítulo uno</b>		
 <b>Biomasa arbórea aérea y almacén de carbono de tres especies de pinales a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque templado del centro de México</b>		
<hr/>		
5. Introducción		25
6. Métodos	6.1. Sitio de estudio	27
	6.2. Características de las especies arbóreas seleccionadas	28
	6.3. Diseño de muestreo	31
	6.3.1. Estimación de la biomasa arbórea y de los almacenes de carbono	31
	6.3.2. Análisis de datos	32
7. Resultados	7.1. Estimación de la biomasa arbórea y los almacenes de carbono	34
	7.1.1. Estructura arbórea	35
	7.1.2. Distribución de la biomasa arbórea y del carbono	41
	7.1.3. Determinación de la biomasa arbórea por medio de ecuaciones alométricas usando factores de corrección	47
8. Discusión	8.1. Estructura arbórea	48
	8.2. Distribución de la biomasa arbórea y del carbono	50
	8.3. Determinación de la biomasa arbórea por medio de ecuaciones alométricas usando factores de corrección	55
9. Conclusión		57
Referencias		58
<hr/>		

---

## Capítulo dos

### Influencia de la temperatura y precipitación sobre el crecimiento arbóreo de dos especies de pinales en un gradiente altitudinal

---

10. Introducción		65
11. Métodos	11.1. Sitio de estudio	67
	11.2. Características de las especies seleccionadas	67
	11.3. Diseño de muestreo	67
	11.3.1. Crecimiento de dos especies arbóreas de bosques templados	67
	11.3.2. Influencia del clima en el crecimiento arbóreo	69
	11.3.3. Análisis de datos	70
12. Resultados	12.1. Crecimiento y almacenes de carbono en dos especies arbóreas de bosques templados	71
	12.1.1 <i>Abies religiosa</i> (HBK) Schl. Et Cham	71
	12.1.2 <i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	77
	12.2. Influencia del clima en el crecimiento arbóreo	85
	12.2.1. Descripción climática de la zona del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan y zonas aledañas entre los años 1961 a 2009	85
	12.2.2. Factores climáticos y el ancho del anillo de crecimiento en <i>Abies religiosa</i>	87
	12.2.3. Factores climáticos y el ancho de los anillos de crecimiento en <i>Pinus hartwegii</i>	88
13. Discusión	13.1. Cambios en la temperatura y la precipitación en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan y zonas aledañas	92
	13.2. Anillos de crecimiento de dos especies de pinales	93
	13.2.1. <i>Abies religiosa</i>	93
	13.2.2. <i>Pinus hartwegii</i>	95
14. Conclusión		98
15. Conclusión general del trabajo		99
Referencias		101

---

## Lista de cuadros y figuras

### Marco Teórico

#### CUADRO

Cuadro 1. Biomasa, productividad y carbono edáfico promedio en tres diferentes tipos de ecosistemas a nivel mundial.	7
--	---

### Capítulo 1

#### CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas, altitud y orientación las zonas de muestreo seleccionadas.	32
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas y de densidad de la madera para estimar la biomasa arbórea utilizadas en los sitios de estudio.	33
Cuadro 3. Características dasométricas de tres especies de pinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	40
Cuadro 4. Biomasa arbórea y almacenes de carbono por componente (fuste, ramas y follaje) en tres especies de pinales en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	43
Cuadro 5. Biomasa arbórea sin factor de corrección y con factores de corrección para la especie <i>Pinus montezumae</i> en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	44
Cuadro 6. Biomasa arbórea sin utilizar el factor de corrección y con factores de corrección para la especie <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan en dos pisos altitudinales.	45
Cuadro 7. Biomasa arbórea sin factor de corrección y biomasa utilizando los factores de corrección para la especie <i>Pinus hartwegii</i> en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	46
Cuadro 8. Biomasa arbórea de bosques templados en diferentes partes del mundo.	54

#### FIGURAS

Figura 1. Estructura diamétrica de <i>P. montezumae</i> en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. (a) piso bajo (3 100 m) y (b) piso alto (3 200 m).	35
Figura 2. Estructura diamétrica de <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, el piso bajo (a) (3 300m) y en el piso alto (b) (3 400 m).	37
Figura 3. Densidad de individuos arbóreos por clases diamétricas (a) en el piso bajo de distribución de la especie <i>Pinus hartwegii</i> (3 300 m) y para el piso alto (3 600 m) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	39
Figura 4. La biomasa arbórea (BA, barras azules) y almacén de carbono (C, barras rojas) aéreas de tres especies de pinales en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Las líneas verticales indican $\pm$ EE.	42
Figura 5. Carbono almacenado en los diferentes pisos altitudinales de muestreo de <i>Pinus montezumae</i> (3 100 y 3 200 m), <i>Abies religiosa</i> (3 300 y 3 400 m) y <i>Pinus hartwegii</i> (3 300 y 3 400 m) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	52
Figura 6. Esquema de resultados obtenidos en este trabajo de las características dasométricas de tres especies de pinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan de acuerdo a la altitud de muestreo y el gradiente de clima	53

descrito por Lauer (1978). Área basal (AB); altura (H); biomasa arbórea (BA); no regeneración observada (NR); regeneración observada (R).

## Capítulo 2

### CUADROS

Cuadro 1. Altitudes de muestreo de dos especies arbóreas seleccionadas en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	69
Cuadro 2. Período de datos utilizados de las series climáticas por cada estación metereológica cercana al área de estudio pertenecientes al Estado de México.	70

### FIGURAS

Figura 1. a) crecimiento (mm) y (b) variación en el ancho del anillo de <i>Abies religiosa</i> en dos pisos altitudinales del Parque Nacional Izta – Popo Zoquiapan. (Piso bajo (Ar-) y piso alto (Ar+).	73
Figura 2. Promedio del ancho de (a) madera temprana (mm) y (b) madera tardía (mm) en dos pisos altitudinales de <i>A. religiosa</i> en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ar (-) y piso alto Ar (+).	74
Figura 3. Tendencia temporal en el ancho del anillo de crecimiento (mm) de la especie <i>Abies religiosa</i> en dos pisos altitudinales (piso bajo rombo sólido (3 100 m) (Ar-) y piso alto cuadro sólido (3 300 m) (Ar+)) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	75
Figura 4. Estandarización de los anillos de crecimiento de la especie <i>Abies religiosa</i> en dos pisos de muestreo (piso bajo rombo sólido (3 100 m) (Ar-) y piso alto triángulo sólido (3 300 m) (Ar+)) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan	76
Figura 5. Carbono acumulado en las diferentes edades de <i>Abies religiosa</i> en dos pisos de muestreo de en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ar (-) 3100 m, piso alto Ar (+) 3 300 m.	77
Figura 6 (a) crecimiento (mm) y (b) variación en el ancho del anillo de crecimiento (mm) de <i>Pinus hartwegii</i> en tres pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++).	80
Figura 7. Promedio de del ancho de madera tardía (mm) de <i>Pinus hartwegii</i> en tres pisos altitudinales, bajo (Ph-), medio (Ph+) y alto (Ph++) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.	81
Figura 8. Variación temporal en el ancho de los anillos de crecimiento (mm) en <i>Pinus hartwegii</i> dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++).	82
Figura 9. Estandarización del ancho del anillo de crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i> en tres pisos altitudinales el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++).	83
Figura 10. Carbono acumulado a lo largo de las diferentes edades de <i>Pinus hartwegii</i> en tres pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-) 3 400 m, piso medio Ph (+) 3 600 m y piso alto Ph (++) 4 000 m.	84
Figura 11. Variaciones anuales de la temperatura (a) y precipitación anual (b) del Parque Nacional Izta-Popo.	86

Figura 12. En la figura se muestran los meses que tuvieron una correlación significativa ( $r^2$ , barras rojas), así como la determinación positiva de los datos ( $r$ , barras azules) con la $t_{min}$ y $t_{max}$ con el ancho del anillo en el piso alto de <i>Abies religiosa</i> (3 300 m, Ar+) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).	88
Figura 13. Se muestran los meses que fueron significativos para la $t_{max}$ y $t_{min}$ con el ancho del anillo en el piso bajo de <i>Pinus hartwegii</i> (3 400 m, Ph -), la correlación se muestra en barras rojas ( $r^2$ ), la determinación fue negativa en todos los casos ( $r$ , barras azules) para el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).	90
Figura 14. Se presentan los meses que fueron significativos en la correlación con el ancho del anillo de crecimiento y la $t_{max}$ y la $t_{min}$ ( $r^2$ , barras rojas) así como la determinación de la correlación ( $r$ , barras azules) las cuales fueron negativas en todos los casos del el piso medio de muestreo de <i>Pinus hartwegii</i> (3 600 m, Ph +), en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).	91
Figura 15. El piso alto de muestreo (4 000 m) de la especie <i>Pinus hartwegii</i> (Ph +) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, todas las determinaciones fueron negativas ( $r$ , barras azules), la correlación con el ancho del anillo de crecimiento y la $t_{max}$ y la $t_{min}$ se muestra en barras rojas ( $r^2$ ) y fue mayor para los meses febrero y abril ( $p < 0.01$ ).	91
Figura 16. Promedio del ancho del anillo de crecimiento para <i>Abies religiosa</i> (piso bajo Ar- y piso alto Ar +), y <i>Pinus hartwegii</i> (piso bajo Ph -, piso medio Ph + y piso alto Ph ++) en un gradiente altitudinales (3 100 hasta los 4 000 m).	93
Figura 17. Fenología general de <i>Abies religiosa</i> (Ar) y <i>Pinus hartwegii</i> (Ph).	97

### Consideraciones finales

#### FIGURAS

Figura 1. El ancho de los anillos de crecimiento se muestra en rojo, mientras en azul se representa la biomasa arbórea a través de la edad de las poblaciones forestales.	100
---	-----

## Resumen

El bosque templado de México es un ecosistema amenazado por diferentes presiones ambientales y antropogénicas como el calentamiento global y el cambio de uso del suelo. La mayoría de los estudios hechos en México sobre bosques templados se han enfocado su capacidad como almacén o fuente de carbono. Sin embargo, la respuesta de estos ecosistemas a cambio ambiental no ha sido suficientemente explorada. Por lo anterior, a través de este trabajo se evaluó la biomasa, los almacenes de carbono, el crecimiento y la influencia del clima en el crecimiento de tres especies en un bosque templado del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

*Pinus montezumae* Lamb, *Abies religiosa* (HBK) Schl. Et Cham y *Pinus hartwegii* Lindl. fueron las especies seleccionadas para la cuantificación de biomasa y carbono. Estos árboles forman grandes masas boscosas monoespecíficas entre los 3200 hasta los 4200 m. La densidad y la biomasa de las poblaciones decrecen con la altitud. Particularmente *P. montezumae* tiene más densidad en el piso bajo que en el alto (1814 y 365 individuos) con los mayores diámetros en la piso bajo ( $61 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) donde la mayor biomasa se determinó en el piso bajo ( $416 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). *A. religiosa* presentó la mayor densidad en el piso bajo en comparación con el alto (515 y 467 individuos) pero el área basal fue mayor en su piso alto ( $53$  y  $71 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), de igual forma, la mayor biomasa se localizó en el piso alto ( $190 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). *P. hartwegii* tuvo una mayor densidad en su piso bajo (681 y 224 individuos, respectivamente), disminuyendo su diámetro ( $36$  y  $35 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y la cantidad de biomasa almacenada conforme aumentó la elevación ( $126$  y  $41 \text{ Mg MS ha}^{-1}$ ). A lo largo del gradiente altitudinal las especies de pinales respondieron de manera diferente a la acumulación de biomasa y carbono. Lo anterior como producto de la variación climática derivada de la elevación, así como de la apertura de nuevos nichos que están siendo explotados por las poblaciones arbóreas.

Por otro lado, las especies que se utilizaron en la evaluación del clima sobre el crecimiento fueron *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*. *A. religiosa* es más longeva en el piso bajo que en el alto (123 y 85 años), además, tanto su crecimiento (20%) como los anchos de sus

anillos de crecimiento fueron mayores en el piso alto (2.33 y 3.40 mm). Esta especie es sensible a las alteraciones ambientales externas como lo son los eventos del niño. Estos eventos climáticos modulan el crecimiento de *A. religiosa* enmascarando los efectos de los estresores climáticos derivados de la elevación o del sitio. Por otro lado, la edad de las poblaciones de los tres pisos de *P. hartwegii* aumentaron con la altitud (102 bajo, 116 medio y 156 alto), mientras que su crecimiento (42% bajo, 37% medio y 25% alto) y el ancho de los anillos (1.74 bajo, 1.75 medio y 1.40 alto, mm) guardaron una relación inversa con la elevación de las poblaciones. Asimismo aún no se registra un decremento en el crecimiento de la especie como consecuencia de la fenología de las poblaciones en la cima de la montaña.

El crecimiento de esta especie de pino respondió al estrés climático derivado de la altitud de establecimiento y no a eventos climáticos externos. Ésta desigualdad en la respuesta de las especies arbóreas (*A. religiosa* y *P. hartwegii*), es un indicador de la aclimatación de cada uno de estos árboles y debe ser considerada para el futuro manejo forestal de los bosques templados, tomando en consideración los principales factores que influyen sobre su crecimiento, la acumulación de biomasa y carbono bajo un contexto de cambio climático.

## Abstract

The temperate forest ecosystem in Mexico is threatened by various environmental and anthropogenic pressures such as global warming and land use change. Most studies in Mexico on temperate forests have focused on its ability as a warehouse or carbon source. However these environments response to environmental changes has not been sufficiently explored. Therefore through this study we evaluated the response of this ecosystem to environmental changes through variations in biomass, carbon stocks, growth and the influence of climate on tree species in the national park Popo-Izta Zoquiapan.

*Pinus montezumae*, *Abies religiosa* and *Pinus hartwegii* species were selected for quantification of biomass and carbon. These trees form large monospecific woodlands between the 3 200-4 200 masl. The density and biomass of populations decreases with altitude. Particularly *P. montezumae* has more density on the ground floor in the high (365 and 1814 individuals) with the largest diameter at the ground floor (61 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), the highest biomass was determined on the ground floor (417 Mg ha<sup>-1</sup>). *A. religiosa* has the highest density in the flat low compared with the high (515 and 467 individuals) but basal area was higher in high regard his flat to low (53 and 71 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), and most biomass is located in the upper floor (190 Mg ha<sup>-1</sup>). *P. hartwegii* has a higher density at its lower floor in relation to the upper floor (681 and 224 individuals), reducing its diameter and the amount of biomass stored as the elevation increases (36 to 35 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) (126 and 41 Mg ha<sup>-1</sup>). Throughout the altitudinal Pinales species respond differently to the accumulation of biomass and carbon, as a result of the above climatic variations derived from the elevation, as well as opening up new niches are being exploited by population tree. Change in precipitation and temperature to exert pressure on growth as well as in physiological adaptations that species have through these gradients.

On the other hand, species that were used in the evaluation of weather and growth were *Abies religiosa* and *Pinus hartwegii*. The age of *Abies religiosa* is longest on the low floor relative to the high (123 and 85), and therefore growth (20%) and the widths of their growth rings was greater

in the high floor (low floor 2.33 and 3.40 mm high floor). This species is a species susceptible to external environmental changes such as child events. These weather events modulate the growth of *Abies religiosa* masking effects of stressors climate from the lifting or the site. On the other hand the age of the populations of the three floors of *Pinus hartwegii* increases with altitude (102 low, 116 medium and 156 high, years) while growth (42% low, 37% medium and 25% high) and ring width (1.74 low, 1.75 medium and 1.40 high, mm) are inversely related with elevation populations. Also not yet registered a natural decrease in the growth of the vegetation of the mountaintop as a result of the age of the populations. The growth of this pine species respond to climate stress derived from the altitude of establishment and not to external climatic events. This inequality in the response of tree species (*Abies religiosa* and *Pinus hartwegii*), is an indicator of the acclimatization of each of these trees and should be considered for future forest management of temperate forests, taking into account the main factors influence their growth, biomass and carbon accumulation in a context of climate change.

## 1. Introducción

El calentamiento global está asociado al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera debido a las actividades antrópicas, principalmente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (IPCC 2007). En general, los modelos de calentamiento global pronostican un incremento entre 2 a 3 °C a nivel global, con una distribución geográficamente heterogénea para el 2060. En la primera mitad del el siglo XX los sistemas montañosos registraron incrementos de 0.13 °C en la temperatura para América del Norte; para la segunda mitad el incremento fue de 0.65 °C y se prevé que seguirá aumentando en la segunda mitad del siglo XXI hasta 2.7 °C bajo condiciones del escenario B1 del IPCC (Nogués-Bravo *et al.* 2007). Como consecuencia de este aumento de temperatura en las montañas se modificarán los actuales gradientes de temperatura, la circulación de los vientos y habrá una reducción en la cantidad de la precipitación (IPCC 2007). Particularmente estos incrementos en la temperatura pueden generar diferentes impactos sobre los procesos de los ecosistemas templados y boreales como la productividad y el ciclo de carbono, entre otros (IPCC 2007).

La fragilidad de ambientes aislados como los de montaña ha sido identificada en algunos modelos desarrollados para el este de Estados Unidos. La distribución y la densidad de las especies se alterarían, por ejemplo, aproximadamente 30 de 80 especies vegetales podrían aumentar en un 10% su población, mientras que otras 30 especies podrían reducirla en la misma proporción y las especies restantes se extenderían aproximadamente 100 km (Inversion y Prasad 1998). En los bosques templados de México, *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* (HBK) Schl. Et Cham presentan un establecimiento de sus poblaciones a mayor altitud de su distribución (García 2000). *A. religiosa* ha logrado establecerse en sitios donde solo *P. hartwegii* se encontraba por ser tolerante a las heladas y a los vientos fríos. Sin embargo; el aumento de temperatura marca el escalonamiento de la estructura de *A. religiosa* indicando la búsqueda de ambientes más frescos y propios de la especie (García 2000). Esto significa que las isotermas a lo largo de los gradientes altitudinales están recorriéndose y puede llegar a modificar la biogeografía del ambiente convirtiendo las zonas árticas en

boreales y a su vez las boreales en templadas, etc. Sin embargo, la colonización de espacios por nuevas especies vegetales no puede ser visible a corto plazo (Nogués-Bravo *et al.* 2007).

Esta vulnerabilidad de las montañas a los cambios ambientales ha sido destacada por el IPCC en su último informe en 2007. El crecimiento y la mortandad de las poblaciones forestales son escenarios que se han contemplado como resultado del alargamiento de las estaciones cálidas, como resultado del efecto invernadero y de la fertilización de los bosques con CO<sub>2</sub> y de NO atmosférico. Aún no se han realizado estudios para efectuar estimaciones precisas del resultado de los gases de efecto invernadero y principalmente del CO<sub>2</sub> atmosférico sobre el crecimiento y la productividad en los ecosistema de montaña en latitudes medias (Díaz-Ferros y Vallejo 2005, García *et al.* 2006).

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Bosques templados y México

Los bosques templados se localizan mayormente en las latitudes norte del planeta en Europa, Norte América y Asia. Cubren alrededor del 8% del área terrestre, es decir, aproximadamente 10 millones de km<sup>2</sup> de la superficie del planeta. Las altitudes de establecimiento son diversas y llegan desde los 1 000 m hasta los 3 500 m. En México, estos ecosistemas se encuentran comúnmente dentro de los cinturones montañosos y son el segundo ecosistema con mayor distribución a nivel nacional (17% del territorio nacional) (Challenger 1998), con la mayor diversidad de pinos y encinos a nivel mundial (50 y 33% del total global respectivamente), por lo cual es considerado un centro de endemismos de estas especies (Rzedowski 2006).

Los bosques templados en México incluyen varios tipos de vegetación. Los más extensos son los bosques de pinos cubren aproximadamente el 75% de los bosques templados, se localizan mayormente en las zonas altas de las montañas. Los bosques de oyamel se encuentran en su mayoría en el Eje Volcánico Transversal con un 5% del total del territorio nacional. Los bosques de *Pseudotsuga menziesii* se distribuyen en condiciones parecidas a las de los bosques de oyamel; sin embargo su distribución se localiza en el norte del país y forman los bosques de “galería”. Por último; los bosques de encino (*Quercus sp.*) se distribuyen en el 14% del territorio nacional y son considerados bosques de transición entre climas secos, cálidos y húmedos (Challenger 1998, Rzedowski 2006).

Masera *et al.* (1992 y 1997) mencionan que la tasa de deforestación del país es de 1 800 ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Específicamente para el centro del país, hasta el año 1997 se perdieron aproximadamente 58 000 ha<sup>-1</sup> producto de la deforestación, los incendios inducidos, la introducción de la ganadería y la agricultura que son las principales causas de la degradación de los bosques templados. La magnitud de los cambios de uso de suelo ha colocado a México en el décimo lugar mundial de emisiones de CO<sub>2</sub> (12.9 Pg C año<sup>-1</sup>), el segundo país con mayores emisiones de CO<sub>2</sub> en Latinoamérica.

Algunas de las medidas que se han implementado para prevenir y evitar la deforestación y la degradación de las zonas templadas, son el manejo forestal controlado, la

reforestación y la creación de áreas naturales protegidas y reservas de la biósfera (Masera *et al.* 1992). En 1935 se promulgó la creación del Parque Nacional Izta-Popo con 45 097 ha<sup>-1</sup>, la mayor extensión en reserva de bosques templados del país que pertenecen a un Parque Nacional. En 2010, fue declarado por la UNESCO como Reserva de la Biósfera de los Volcanes anexando 126 677 ha<sup>-1</sup> a su superficie (CONANP 2011). El Parque Nacional brinda diferentes servicios ecosistémicos, entre los que destacan, el abastecimiento de agua a las cuencas hidrológicas del Valle de México y la del alto Balsas. Otros consisten en la captura de carbono en la biomasa arbórea que sostiene en su gran extensión territorial, la regulación del clima y la generación de oxígeno para las ciudades cercanas. Asimismo la purificación del aire y la asimilación de algunos contaminantes atmosféricos; la protección de la biodiversidad que habita en el área realzan el valor ecológico y cultural de la zona (CONANP 2011).

En México, como medida de mitigación al cambio climático se ha evaluado la posibilidad de fijar hasta 5 400 millones de toneladas de carbono en 100 años; es decir, entre 35-54 millones de toneladas de carbono por año, de las cuales 167 t C ha<sup>-1</sup> estarían incorporadas en los bosques de coníferas (Torres y Guevara 2002). Dentro de estas modelaciones las áreas naturales protegidas tienen un potencial de captura de carbono de 40-130 t C ha<sup>-1</sup> a lo largo de 100 años y en particular la zona Izta-Popo Zoquiapan puede fijar sólo en la vegetación de bosques de pino, 3.6 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Torres y Guevara 2002). A pesar de esto, la degradación del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan es inminente; dentro de los tres estados que ocupa existen zonas perturbadas por la tala ilegal, ganadería o por disturbios naturales. Cerca de un tercio del área se han determinado como zonas de restauración prioritaria dentro del Parque, donde, organizaciones privadas y gubernamentales han puesto en marcha varios proyectos de reforestación y de captura de agua de lluvia, mejorando la calidad de los servicios ecosistémicos que brinda (PRONATURA 2009). La permanencia de los bosques y sus funciones es vital para la sobrevivencia de la vida dentro y alrededor de éstos. La adecuada explotación de los servicios ecosistémicos, implica la creación de mercados competitivos para generar las ganancias económicas necesarias para el sustento de las áreas boscosas.

## 2.2. Ciclo del carbono y biomasa en bosques templados

El carbono atmosférico en forma de CO<sub>2</sub> es incorporado a la vegetación por medio de la fotosíntesis (120 Pg C año<sup>-1</sup> en todo el planeta). Este carbono es uno de los principales almacenes de carbono terrestre con 850 Pg C, de los cuales, 550 Pg C están en la biomasa viva y 300 Pg C en el mantillo (Schlesinger 2005). La distribución del carbono vegetal varía entre ecosistemas; después de los bosques tropicales (217 Mg C ha<sup>-1</sup>), los bosques templados almacenan 79 Mg C ha<sup>-1</sup> que es el 22 % del carbono orgánico contenido en los ambientes terrestres (Cuadro1) (Malhi *et al.* 1999).

La productividad primaria neta del ecosistema, que es la cantidad de nuevo tejido vegetal que se genera cada año, guarda una relación con la biomasa (entre el 45 y 50% de la biomasa seca de los individuos arbóreos es carbono); sin embargo, el incremento de materia en cada uno de los componentes arbóreos se comporta de forma independiente. Alrededor del 10% de los almidones producto de la fotosíntesis son utilizados en la producción de follaje; que es el compartimiento que menos productividad tiene (350 g C m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). En contraste, el fuste o las raíces asimilan el 50% de los fotosintatos para el incremento de su biomasa (2 000 g C m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). El carbono almacenado en la biomasa, puede regresar al ciclo de manera lenta por medio de la respiración de compartimientos arbóreos (aproximadamente el 57% de la biomasa que se produce se consume durante la respiración de los bosques a lo largo de un año), o rápida como producto de los incendios, la descomposición de la materia orgánica a través de la muerte de los árboles y el manejo forestal (Martin *et al.* 2001, Litton *et al.* 2007).

La biomasa vegetal es dinámica, puede variar por los cambios en el uso y manejo de las áreas forestales, los disturbios naturales y la fenología del sitio; así como, por los cambios fisiológicos o metabólicos originados por el ambiente (Houghton *et al.* 2009). Por ejemplo, Mendoza y Galicia (2010) estudiaron poblaciones arbóreas de bosques templados en Cofre de Perote Veracruz, donde reportaron la mayor cantidad de biomasa y carbono en bosques maduros de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* (156 y 177 Mg ha<sup>-1</sup>; respectivamente), en comparación de sitios con regeneración de *Pinus montezumae* y *A. religiosa* (130 Mg ha<sup>-1</sup>) y

con plantaciones forestales, donde predominaban las especies *Pinus patula*, *Pinus teocote*, *Pinus oaxacana* (126 Mg ha<sup>-1</sup>).

Los inventarios forestales permiten llevar un registro de la biomasa adicionada por plantaciones en los ecosistemas templados; así como la cantidad de biomasa retirada. Sin embargo, la tala ilegal en zonas naturales vuelve imposible de calcular la degradación de los ambientes. Por otro lado; en las zonas tropicales no existen inventarios forestales como los de las zonas templadas y el control de las perturbaciones antropogénicas relacionadas con el cambio de uso de suelo a cultivos agrícolas, no es fielmente cuantificable por medio de percepción remota (Houghton *et al.* 2009) La cantidad de biomasa que se adiciona por el abandono de tierras o la rotación de cultivos es imperceptible para estos métodos. La necesidad de conocer los balances de carbono orgánico en estos ambientes es urgente; la deforestación en los trópicos y los cambios en biomasa aérea en bosques templados limita la cuantificación precisa de los balances de carbono orgánico. Los principales factores abióticos que intervienen en el metabolismo vegetal de las poblaciones forestales de los bosques templados varían dentro de las zonas; originando isothermas definidas que controlan las tasas fotosintéticas y la respiración de las diferentes especies arbóreas de los bosques. Se ha registrado que estos límites climáticos están cambiando verticalmente, modificando la productividad de los ecosistemas y su composición a lo largo del tiempo (Martin *et al.* 2001).

### **2.3. Factores abióticos y el crecimiento arbóreo**

La temperatura es el factor climático que modula las tasas metabólicas del crecimiento y la fotosíntesis, cuando las temperaturas coinciden se induce una mayor acumulación de biomasa. Cunningham y Read (2003) mencionan que la relación existente entre las tasas fotosintéticas y las tasas de crecimiento no es lineal, el crecimiento máximo óptimo de los árboles se produce cuando la asignación de productos hacia los tejidos es mayor y no necesariamente cuando la actividad fotosintética es elevada. Los diferentes requerimientos ecofisiológicos de los diversos procesos generan una disparidad entre éstos, temporalizando y priorizando el destino de los diferentes productos de la fotosíntesis, ya sea para reserva y

mantenimiento del árbol (almidón y sacarosa) y/o la formación de tejidos (celulosa). Por ejemplo, la tasa fotosintética en bosques templados de Australia ocurre entre los 20 y 22 °C en el cual se producen sustancias nutritivas para el árbol; mientras que la asignación de recursos para el crecimiento óptimo se origina entre los 27 y 30 °C. (Cunningham y Read 2003).

Cuadro1. Biomasa, productividad y carbono edáfico promedio en tres diferentes tipos de ecosistemas a nivel mundial.

Ecosistemas	Biomasa (ecosistema)	Productividad (ecosistema)	Densidad de C en suelos
	(Mg ha <sup>-1</sup> )	(g C m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	(Mg C ha <sup>-1</sup> )
Bosque tropical	217	170	123
Bosque templado	79	150	96
Bosque boreal	49.2	110	343

(Malhi *et al.* 1999)

La máxima tasa de fijación de carbono y formación de tejidos en bosques templados se relaciona con la temperatura y las lluvias durante el verano; mientras en el resto del año la respiración es mayor significando la pérdida o uso de carbono (Stevens y Fox 1991). El resultado del balance de carbono del ecosistema resulta en un déficit de éste para la producción celular; sin embargo, se ha observado que la capacidad de recuperación de los requerimientos nutricionales de la planta se realiza en días o semanas. Por ejemplo; Körner (1998) concluyó que la especie *Pinus aristata* compensa el total del carbono invertido en un periodo de crecimiento de dos o tres semanas en el verano, justo cuando su tasa fotosintética está a su máxima capacidad. Sin embargo, otras especies como *Pinus cembra* requiere sólo de un día al año para equilibrar la pérdida de carbono de todo el ciclo de crecimiento. Aunque el individuo arbóreo produce almacenes de almidón durante la estación de verano; éstos se usan para tolerar el estrés ambiental y conservar las asociaciones ectomicorrízicas, las cuales son aprovechadas para el mantenimiento del individuo y no para su crecimiento. La teoría propone las diferencias de carbono en el metabolismo en un ciclo fenológico, sin embargo, no

explica completamente las restricciones de crecimiento en los bosques templados ni el establecimiento del límite vegetacional arbóreo (Körner 1998).

Las presiones ambientales que se ejercen sobre las especies arbóreas son diferentes a lo largo de los gradientes altitudinales de las montañas. Cunningham y Read (2003) propusieron que hay un crecimiento máximo cuando las poblaciones arbóreas se encuentran a la mitad de su intervalo de distribución; conforme se acercan a sus límites extremos latitudinales y altitudinales la biomasa se reduce. A lo largo de la montaña, la amplitud del nicho ecológico de las especies de bosques templados se enmarca no solo en la tolerancia a incrementos de temperaturas anuales o diurnas extremas que sufren en los extremos de su establecimiento; si no en la optimización de los recursos almacenados para un mayor crecimiento (Coomes y Allen 2007). La baja altura y el poco diámetro del fuste de las especies templadas establecidas en las cimas de las montañas no se le puede atribuir a la eficiencia fotosintética de estas especies; los complejos fotosintéticos son similares en capacidad que las especies establecidas en altitudes no elevadas. Sin embargo, estas especies e individuos han adoptado un sistema de crecimiento conservado como resultado de la estacionalidad y la duración de su época de crecimiento (Loehle 1998). Las adaptaciones fenológicas de los bosques implican también adaptaciones fisiológicas a las estaciones climáticas, los ajustes morfológicos aumentan la tolerancia y la sobrevivencia de la población arbórea. Una mayor lignificación de los tejidos de las hojas, cutículas más gruesas y la saturación de lípidos, azúcares y proteínas ayudan a tolerar las estaciones frías y secas mermando la producción de biomasa (Loehle 1998).

Modelaciones sobre el crecimiento arbóreo en bosques templados de latitudes medias, con aumento de CO<sub>2</sub> y un incremento de 1 a 2 °C en temperatura sugieren que la acumulación de biomasa arbórea será mayor que en la actualidad (IPCC 2001). Sin embargo, el sistema es pobre en agua y al aumentar la temperatura la cantidad de humedad del suelo disminuirá y se restringirá la respuesta del ecosistema causando la muerte de los individuos arbóreos (Cunningham y Read 2002). En California, se ha documentado que los rodales cercanos a la línea límite vegetacional están muriendo como consecuencia del estrés térmico

e hídrico, impidiendo el recambio de la vegetación y la extinción paulatina de las especies (van Mantgem y Stephenson 2007).

#### **2.4. Cuantificación de la biomasa arbórea viva sobre el suelo**

Uno de los métodos tradicionales para la determinación de la biomasa contenida en las especies arbóreas forestales es por medio de las ecuaciones alométricas. Estas funciones relacionan de manera exponencial el peso seco de la biomasa y una o varias variables dasométricas de los individuos arbóreos [eq. 1] (Bravo *et al.* 2007). La construcción de las ecuaciones alométricas se hace por medio de métodos destructivos, se estima el peso verde y el peso seco de cada uno de los componentes de cada árbol seleccionado, con lo cual se genera un modelo matemático para cada especie (Jiménez 2010).

Por otro lado los modelos generales se aplican sin considerar la especie y su forma de vida, son ecuaciones que normalmente son construidas a partir de otras ecuaciones matemáticas ajustadas al sitio de estudio por medio del volumen o la densidad de la madera de las especies dominantes, estos modelos generales se utilizan en ambientes muy heterogéneos como los bosques tropicales. Sin embargo, la diversidad de especies y de diferentes componentes arbóreos utilizados para ajustarlos pueden producir una variación en la estimación de la biomasa entre un 10 y un 30% (Chave *et al.* 2004). Para hacer las comparaciones estadísticas, las ecuaciones alométricas se usan en forma logarítmica: al cambiar la curva normal de crecimiento del árbol (exponencial) [eq. 2] (Bravo *et al.* 2007), el sesgo en las determinaciones aumenta, disminuyendo la exactitud en el monitoreo (Araújo *et al.* 1999).

Se han comparado otros modelos de estimación de biomasa por medio de ecuaciones alométricas; el método “reduccionista” que tiene como base teórica la geometría fractal y el tamaño de los individuos, la comparación entre ecuaciones teóricas y empírica y el muestreo con árboles pequeños. El método reduccionista tienen una pobre estimación de la biomasa ya que la relación tamaño y forma cambian durante la ontogenia del árbol; además, las especies que se establecen en ambientes similares difieren en su crecimiento adquiriendo

distintas dimensiones. La comparación entre ecuaciones teóricas y ecuaciones empíricas corrobora que éstas últimas tienen mayor capacidad de predicción que los modelos teóricos. West *et al.* (1999) apoyaron la hipótesis de modelos teóricos por ser más predictivos y exactos; aunque se sacrifica la practicidad al gran número de mediciones en campo que se deben de llevar a cabo para su calibración. Asimismo, se comprometen los intervalos específicos de crecimiento de biomasa y diámetro, eliminando la interpretación ecológica de las ecuaciones (Zianis y Mencuccini 2004). El último método que valoraron Zianis y Mencuccini (2004) fue el muestreo con árboles pequeños (<23 cm), con una variación menor a tres centímetros de diámetro entre los individuos para generar una muestra de valores continuos. La biomasa de árboles de diámetro pequeño afectó los valores de los coeficientes de las ecuaciones alométricas, específicamente la relación masa-diámetro. De los tres métodos anteriores, el más eficiente en el valor predictivo de la estimación de biomasa fue el muestreo con árboles pequeños. Aunque con éste se elimina la diversidad de edades de una población arbórea, alterando los planes de manejo forestal que se lleven a cabo en el área debido a la homogeneización de la muestra colectada (Zianis y Mencuccini 2004). La corrección de estas incertidumbres creadas al transformar los datos de su forma exponencial a logarítmico ha tomado gran impulso bajo contexto de pago de bonos de carbono y de la fiel determinación de la cantidad de carbono potencialmente almacenado en los bosques templados de latitudes medias.

Por lo anterior, se han propuesto el uso de algunos factores de corrección, para lograr la conciliación entre los modelos exponenciales y los logarítmicos (Chave *et al.* 2004). Smith (1993) propuso el uso de un factor de corrección (FC) para evitar los sesgos estadísticos. Desde entonces autores como Araújo *et al.* (1999), Ketterings *et al.* (2001), Chave *et al.* (2004, 2005), Zianis y Mencuccini (2004) y Bravo *et al.* (2007) entre otros; han basado algunas de sus investigaciones en buscar un factor de corrección que reduzca la incertidumbre creada por las ecuaciones alométricas. Ésta concordancia entre ecuaciones exponenciales y las logarítmicas se puede hacer a través de tres factores propuestos por Smith (1993); el “quasi-maximum likelihood estimator” (QMLE) que subestima la cantidad de biomasa y “smearing

estímata” (SE) y “ratio estimator” (RE) que la sobreestiman. Los atributos estadísticos que se utilizan en los factores de corrección son los que marcan la pauta para las variaciones de biomasa.

$$y=aX^b \quad [\text{eq 1}]^1$$

Donde y es el peso o fracción de biomasa (kg)

x es la variable dasométrica del árbol (diámetro, altura, etc.)

a y b son parámetros del modelo

$$\ln y = b \ln X + \ln a + \ln FC \quad [\text{eq 2}]^1$$

Factor de corrección (FC)

(1) Bravo *et al.* (2007)

## 2.5. Crecimiento secundario arbóreo y dendrocronología

La interacción vegetación-clima es una de las principales correlaciones que modelan la estructura poblacional arbórea. Los efectos del clima sobre el crecimiento arbóreo se manifiesta en la forma en la que crecen los árboles lo largo del tiempo, con lo cual es posible hacer registros dendrocronológicos y reconstruir los procesos que han ejercido alguna influencia sobre el crecimiento de la vegetación (Cullen *et al.* 2001). La temperatura y la humedad son los factores climáticos que más influyen en la xylogénesis; además de los fotoperiodos que regulan y modifican la fisiología y bioquímica de los bosques templados, definiendo la fenología de los individuos arbóreos (Smith 2000).

La fenología indica los cambios cíclicos de las plantas (por ejemplo, en el crecimiento, floración, maduración de los frutos etc.) en relación con los cambios estacionales del clima. La época de crecimiento cuando las condiciones ambientales son óptimas, varía notablemente entre los diferentes ecosistemas terrestres. Estas temporadas son de 40 días en las zonas polares y de 160 días en las zonas subtropicales (Smith 2000). La sincronía de estos ciclos con el clima resultan de adaptaciones de las plantas de las zonas templadas que evitan que las células del fuste dejen de producirse antes de la lignificación celular de invierno (la madera tardía); cuando esta lignificación aún no se inicia se registran las tasas máximas de ensanchamiento (madera temprana) (Smith 2000). El descongelamiento de la superficie del suelo y el aumento de la temperatura en el aire influye sobre la fenología de las especies de forma diferencial. Por ejemplo la etapa de actividad celular, es decir el inicio de la formación de un anillo de crecimiento para oyameles inicia en abril, mientras que para los pinos es en mayo en especies de Norte América (Zimmermann 1983, Vaganov *et al.* 2006).

Por otro lado, la estacionalidad de las lluvias reduce la disponibilidad de agua en estos sistemas a lo largo del año, disminuyendo la respiración y la evapotranspiración en las especies de pinales, con lo cual la productividad y asimilación de CO<sub>2</sub> se ven afectados negativamente (Rossi *et al.* 2006). En el norte de México, la frecuencia y abundancia en la precipitación invernal moderan el crecimiento radial, estas lluvias tienen más injerencia sobre el crecimiento de los anillos que las lluvias que se presentan en verano o en primavera. La poca humedad que almacenan los suelos y la absorción de agua de las raíces, explica la relación entre el crecimiento y el periodo de abundancia hídrica. En los últimos siglos, se han registrado cuatro sequías importantes en el norte del país, marcando una disminución en la productividad de la zona en bosques templados caducifolios de 1.18 mm año<sup>-1</sup> a 0.82 mm año<sup>-1</sup> entre periodos húmedos a secos (Arreola-Ortíz y Návar-Cháidez 2010).

En respuesta a las sequías, se han sugerido que en los ecosistemas templados las plantas presentan algunas adaptaciones para contrarrestar el cierre de estomas, como aumentar la conductividad hidráulica por unidad de área de la madera cuando hay disponibilidad de agua, así como modificaciones en proteínas transmembranales

(acuaporinas), las cuales regulan el nivel de conductividad hidráulica de la hoja y en general de los tejidos del xilema. Las acuaporinas se vuelven parte de un gel extravascular de los tejidos arbóreos de sistemas templados, generando la tensión necesaria para el flujo de agua dentro del sistema (Martre *et al.* 2002). Estos mecanismos le permiten a las plantas ser tolerantes a altas tasas de transpiración, sin riesgo de sufrir una cavitación en la columna de agua, manteniendo el sistema de evapotranspiración habilitado para la estación de lluvias (Bréda *et al.* 2006) y continuar con su crecimiento.

El clima, la fenología y el crecimiento de la biomasa en las especies arbóreas tienen relación con la altitud. Por ejemplo, en las poblaciones de *Nothofagus* sp en Nueva Zelanda presentan claras diferencias dendrocronológicas entre las que se localizan en la cima de la montaña en comparación con las de la parte media (Cullen *et al.* 2001). Los límites superiores altitudinales de la vegetación presentan una redistribución de las reservas de metabolitos fotosintéticos, además de que la viabilidad de las semillas y los tiempos de reproducción son menores. Como consecuencia, las poblaciones son más longevas y las plantas presentan un menor índice de crecimiento y un mayor daño por heladas de los últimos siglos. Mientras que las poblaciones con mayor reclutamiento de juveniles se encuentran en las zonas medias y bajas de la montaña, con un mayor índice de aumento de biomasa, anillos más anchos y más tolerancia al estrés climático (Stevens y Fox 1991, Körner 1998).

La sensibilidad de las montañas al cambio climático puede influir negativamente sobre los procesos que determinan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas que alberga (IPCC 2007). Por un lado, el clima de los bosques templados de América del Norte ha aumentado en 0.8°C con un aumento en la precipitación de un 14% en los últimos años, lo que ha incrementado su productividad volviéndolos sumideros potenciales de carbono (Boisvenue y Running 2006). En contraste, en Europa en 2003 se registró el año más seco de la última década, lo que redujo significativamente la captura de CO<sub>2</sub> de los bosques por la baja evapotranspiración registrada. Además el ingreso de carbono orgánico al ciclo debido a las altas tasas de mortalidad de la población forestal, ha convertido a los bosques templados de latitudes norte en fuentes potenciales de carbono en los últimos años (Rossi *et al.* 2006).

Sin embargo, aún no es claro si esta acentuación en las concentraciones de CO<sub>2</sub> afectará directamente la fenología de los árboles. En Europa, se ha registrado una extensión de once días en los periodos de crecimiento respecto hace 40 años (Canadell y Pataki 2002). De igual forma, los bosques de pinos mostraron un incremento en su diámetro en rangos de 0.85 mm a 1.5 mm respecto al siglo pasado; además, en Austria se apreció un incremento en el área basal del 17% en el periodo de 1961 a 1970 y en la década de 1980 (Mielikäinen y Sennov 1996).

Otra predicción como consecuencia del CC es que los límites arbóreos tendrán un avance altitudinal de establecimiento. Los primeros registros de la redistribución de las poblaciones arbóreas en las cotas de mayor elevación en las cimas de las montañas se registraron en Nueva Zelanda, avanzado aproximadamente diez metros desde 1860, correlacionando este ascenso con un incremento de 0.5°C en la temperatura ambiente (Wardle y Coleman 1992). Escalamientos mayores se han registrado por todo el mundo; en pinos de Bulgaria se ha documentado un avance de 200 m desde el año 1970 (Bertin 2008). Los registros paleoecológicos muestran que las especies de bosques templados se extendieron 100 m durante el Holoceno temprano; lo que sugiere que son poblaciones de rápida migración cuando se presenta un incremento en la temperatura. Los modelos realizados para este siglo indican que las tasas de migración de las poblaciones actuales de bosques templados serán más rápidas en este siglo como consecuencia de una mayor diversidad genética que la de siglos anteriores (McLachlan *et al.* 2005).

### 3. Planteamiento del problema y objetivos

En México, los bosques templados están ampliamente distribuidos en las regiones montañosas y son la principal cobertura forestal nacional, ocupando alrededor del 17% de la superficie del país, después de las coberturas forestales tropicales (Rzedowski 2006). Estos ecosistemas juegan un papel importante en la regulación del clima a nivel local y regional, manteniendo las temperaturas ambientales más bajas o la humedad relativa más elevada (IPCC 2007). Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez (1998) determinaron que los tipos de vegetación más afectados en México por el calentamiento global debido a la poca extensión que tienen serán los bosques mesófilos de montaña (1.3% de su distribución actual), después los bosques templados (1%). Asimismo se ha modelado que las poblaciones vegetales asentadas en climas semifríos como lo son los bosques templados serán desplazadas por tipos de vegetación de climas cálidos, estableciéndose a mayor altitud o extinguiéndose.

La mayoría de los estudios realizados sobre el calentamiento global en México están orientados al papel que juegan los ecosistemas forestales como sumideros o fuentes de carbono (Ordoñez *et al* 2008). A nivel nacional se desconoce cómo los bosques templados influyen en la producción y distribución de la biomasa aérea; así como su potencialidad en el almacenamiento de C. Sin embargo, en las últimas décadas ha surgido un interés considerable en analizar la respuesta de los ecosistemas al cambio ambiental. Por ejemplo, numerosos estudios se han centrado en investigar cómo afecta la temperatura la producción de biomasa y el crecimiento arbóreo a través de los gradientes altitudinales en los sistemas montañosos, donde las condiciones de temperatura y precipitación han cambiado bajo calentamiento global (Aiba *et al.* 2007). Sin embargo, las zonas de latitudes medias y su respuesta a las adversidades climáticas como resultado del calentamiento global han tenido poca atención de estudio. La evaluación de los efectos del clima sobre las especies vegetales y la adaptación de éstas a las alteraciones en los factores climáticos se ha subestimado. Por lo anterior, los servicios ecosistémicos que brindan los bosques templados de México como la captura de CO<sub>2</sub> deben de re-valorarse bajo contexto del actual calentamiento global.

Comprender la estructura y la dinámica de los bosques agrega valor a estos sistemas promoviendo su conservación, la cual es sustancial para el ciclo global del carbono y sus repercusiones climáticas. El objetivo general del presente trabajo es evaluar el potencial de almacenamiento de carbono orgánico y el efecto del cambio altitudinal sobre la biomasa aérea y crecimiento en especies vegetales de bosques de alta montaña en la zona del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Los objetivos particulares son: (a) cuantificar la biomasa y los capitales de carbono del componente arbóreo aéreo en especies de pino y oyamel en regiones de alta montaña; (b) determinar si los factores de corrección a las estimaciones de biomasa son necesarios en ambientes con baja diversidad arbórea; (c) caracterizar el crecimiento y la acumulación de carbono a través de los anillos de crecimiento en especies de pino-oyamel y (d) entender la relación entre la precipitación y la temperatura con el crecimiento de dos especies de pinales en un gradiente altitudinal.

#### 4. Hipótesis

Los bosques del parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan son bosques templados de latitudes medias en donde el clima y la vegetación responden a los gradientes altitudinales. Conforme aumenta la elevación, la precipitación, la capacidad de retención de agua edáfica y la temperatura disminuyen; en contraste, la radicación solar y la evapotranspiración aumentan (Torres 2013). Lo cual produce que los recursos liberados al medio para la acumulación de biomasa y carbono sean distintos a través de la elevación, por lo anterior:

- La cantidad de biomasa arbórea y carbono disminuirá conforme la elevación aumenta.
- La mayor cantidad de biomasa arbórea y carbono corresponderá a *Pinus montezumae*, seguida de *Abies religiosa* y por último *Pinus hartwegii*; asimismo la biomasa arbórea y el carbono será mayor en los pisos bajos que en los pisos altos en cada una de las tres especies.

La relación entre el crecimiento anual de las especies y la influencia del clima se puede determinar por medio de técnicas dendrocronológicas. Esta respuesta es particular de cada especie y de las condiciones fisiológicas necesarias para su establecimiento, crecimiento y reproducción. Por ejemplo, *A. religiosa* requiere de mayor humedad edáfica y es tolerante a los incrementos de temperatura ambiente (Bernal y Terrazas 2000), mientras que *P. hartwegii* se distribuye principalmente en la cima de la montaña donde las heladas y el estrés hídrico (Biondi 2001, Ricker *et al.* 2007); por lo anterior:

- El ancho de los anillos de crecimiento en las especies *A. religiosa* y *P. hartwegii* será mayor en los pisos bajos de muestreo en relación con los pisos altos.
- El ancho de los anillos de crecimiento será menor en *P. hartwegii* en relación al ancho de los anillos de *A. religiosa*.
- *P. hartwegii* y *A. religiosa* presentarán un mayor ancho de anillos con el aumento de temperatura en primavera y con las lluvias en verano, así como con los años más calurosos y lluviosos debido a la liberación de recursos como la precipitación y el incremento de calor.

## Referencias

- Aiba S, Hanya G, Tsujino R, Takyu M, Seino T, Kimura K, Kitayama K (2007) Comparative study of additive basal area of conifers in forest ecosystems along elevational gradients. *Ecological Research* 22:439-450.
- Araújo T, Higuchi N y De Carvalho J (1999) Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the estate of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management* 117:43-52.
- Arreola-Ortíz M y Návar-Cháidez J (2010) Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern. y su asociación con el Niño en el nordeste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 71:7-20.
- Bernal S y Terrazas T (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Maderas y Bosques* 6(001):73-86.
- Bertin R (2008) Plant Phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society* 135(1):126-146.
- Bickford I, Fulé P y Kolb T (2011) Growth sensitivity to Drought of Co-Occurring *Pinus sp.* Along an Elevation Gradient in Northern Mexico. *Western North American Naturalist* 71(3):338-348.
- Biondi F (2001) A 400-year tree-ring chronology from the tropical treeline of North America. *Royal Swedish Academy of Sciences* 30:162-166.
- Boisvenue C y Running S (2006) Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12:862-882.
- Bravo F, Delgado J, Gallardo J, Bravo-Oviedo A, Ruiz-Peinado R, Merino A, Montero G, Cámara A, Navarro R, Ordóñez C, Canga E (2007) Métodos para cuantificar la fijación de CO<sub>2</sub> en los sistemas forestales. En: *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático (2007)*. Barcelona, España. Fundación Gas Natural. 315 pp.

- Bréda N, Huc R, Granier A y Dreyer E (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63:625-644.
- Canadell J y Pataki D (2002) New advances in carbon cycle research. *Trends in Ecology and Evolution* 17:156-158
- CONANP (2011) Biodiversidad del Parque Nacional. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Fecha de consulta agosto 2011.
- Challenger, A., y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, en *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 87-108. En.
- Challenger A (1998) Utilización de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), Ciudad de México, México. México D.F. 459 pp.
- Chave J, Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Lao S y Perez R (2004) Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359:409-420.
- Coomes D y Allen R (2007) Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95:1084-1097.
- Cullen L, Palmer J, Duncan R y Stewart G (2001) Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forest. *Canadian Journal of Forest Research* 31:1981-1991.
- Cunningham S y Read J (2003) Comparison of temperate and tropical rainforest tree species: growth responses to temperature. *Journal of Biogeography* 30:143-153.
- Díaz-Ferros F, Vallejo R (2005) Impactos sobre los recursos edáficos. En: Moreno Rodríguez JM (ed.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, pp. 355-398.
- García G (2000) Comportamiento de la dinámica sucesional de *Abies religiosa* (HDK) SCHL. et. CHAM., Y *Pinus hartwegii* LINDL., en la estación forestal experimental Zoquiapan,

- Estado de México. Tesis licenciatura, Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales.
- García-Oliva F, Hernández G, Gallardo J (2006) Comparison of ecosystem C pools in three forest in Spain and Latin-America. *Annals of Forest Science* 63:519-523.
- Greenberg J, Dobrowski S y Vanderbilt V (2009) Limitations on maximum tree density using hyperspatial remote sensing and environmental gradient analysis. *Remote Sensing of Environment* 113:94-101.
- Houghton R, Forrest H y Goetz S (2009) Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research* 114: G00E03, doi:10.1029/2009JG000935
- IPCC (2011) Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Tercer Reporte de Evaluación. Contribución de los Grupos de Trabajo al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012
- IPCC (2011) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y A. Reisinger (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012
- Inversion L y Prasad A (1998) Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs* 68:465-485.
- Ketterings Q, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y y Palm C (2001) Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forest. *Forest Ecology and Management* 146:199-209
- Körner C (1998) A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115:445-459.
- Lauer W (1978) Timberline Studies in Central Mexico. *Arctic and Alpine Research* 10(2):383-396.

- Litton C, Raich J y Ryan M (2007) Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13:2089-2109.
- Loehle C (1998) Height growth rate tradeoffs determine northern and southern range limits for trees. *Journal of Biogeography* 25:735-742.
- Malhi Y, Baldocchi D y Jarvis P (1999) The carbon balance of tropical, temperate and boreal forest. *Plant, Cell and Environment* 22:715-740.
- Martin P, Nabuurs Gert-Jan, Aubinet M, Karjalainen T, Vine E, Kinsman J y Heath L (2001) Carbon Sinks in Temperate Forest. *Annual Review of Energy and the Environment* 26:435-65.
- Martre P, Morillon R, Barrieu F, North G, Nobel P y Chrispeels M (2002) Plasma membrane aquaporins play a significant role during recovery from water deficit. *Plant Physiology* 130:2101-2110.
- Masera O, Ordóñez M y Dirzo R (1997) Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:256-295.
- Masera O, Ordoñez M y Dirzo R (1992) Emisiones de carbono a partir de la deforestación en México. *Ciencia* 43:151-153.
- McLachlan J, Clarck J y Manos P (2005) Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change. *Ecology* 86(8):2088-2098.
- Mendoza-Ponce A y Galicia L (2010) Aboveground and belowground biomass and carbon pools in Highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83(5):497-506.
- Mielikäinen K y Sennov S (1996) Growth trends of forest in Finlandia and North-Western Russia. En: *Growth Trends in European Forest*. Eds. Spiecker H, Mielikäinen K, Köhl K y Skovsgard J. Springer Berlin.
- Nogués-Bravo D, Araújo M, Errea M y Martínez-Rica J (2007) Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21<sup>st</sup> Century. *Global Environmental Change* 17:420-428.

- Pronatura (2009) Restauración de Servicios Ambientales en el Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan, [http://qacontent.edomex.gob.mx/congresopsa/documentos/ponencias/groups/public/documents/edomex\\_archivo/congresopsa\\_pdf\\_reforestacion.pdf](http://qacontent.edomex.gob.mx/congresopsa/documentos/ponencias/groups/public/documents/edomex_archivo/congresopsa_pdf_reforestacion.pdf). Fecha de consulta 2013.
- Ricker M, Gutiérrez-García G y Daly D (2007) Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Research* 37:977-989.
- Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Morin H, Saracino A, Motta R y Borghetti M (2006) Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist* 170:301-310.
- Rzedowski J (2006) Vegetación de México. 1era. Ed. digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Schlesinger W (2005) Biogeochemistry. Vol. 8 En: *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Science. Berlin, págs. 720.
- Smith H (2000) Phytochromes and light signal perception by plants – an emerging synthesis. *Nature* 407: 585–591.
- Smith R (1993) Logarithmic Transformation Bias in Allometry. *American Journal of Physical Anthropology* 90:215-228.
- Stevens G y Fox J (1991) The causes of treeline. *Annual Review of Ecology and Systematics* 22:177-191.
- Torres B (2013) Análisis de los cambios del límite superior del volcán Iztaccíhuatl. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. 122 págs.
- Torres J y Guevara A (2002) Servicios ambientales en México: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63:40-69.
- Vaganov E, Hughes M y Shashkin A (2006) Growth dynamics of conifer tree rings. *Images of past and future environments*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp 350.

- Van Mantgem P y Stephenson N (2007) Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest. *Ecology Letters* 10:909-916.
- Villers-Ruiz L y Trejo-Vázquez I (1998) Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23:1.
- Wang Ch (2006) Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forest. *Forest Ecology and Management* 222:9-16.
- Wardle P y Coleman M (1992) Evidence for rising upper limits of four native New Zealand forest trees. *New Zealand Journal of Botany* 30:303-314.
- West G, Brown J, Enquist B (1999) The fourth dimension of life: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science* 284:1677-1679.
- Zianis D y Mencuccini M (2004) On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187:311-332.
- Zimmermann M (1983) Xylem structure and the ascent of Sap. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, págs.143.

## Capítulo uno

Biomasa arbórea aérea y almacén de carbono de tres especies de pinales a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque templado del centro de México

## 5. Introducción

La relación entre la biomasa y la latitud ha sido objeto de numerosos estudios en los bosques tropicales húmedos (Kitayama y Aiba 2000). En general en estos ecosistemas la biomasa, la altura y la productividad se reducen con el incremento de la elevación, sin embargo, otros estudios no han encontrado el patrón antes mencionado. Esta variabilidad está probablemente relacionada con los factores ambientales como la temperatura, la precipitación, la humedad, la radiación solar que controlan el crecimiento y la acumulación de biomasa. En contraste, en las montañas los parámetros climáticos como la temperatura y la lluvia cambian en distancias cortas como resultado de los gradientes de elevación (Beniston 2003, Nogués-Bravo *et al.* 2007); los cuales tienen el potencial de influir negativamente sobre el crecimiento y la acumulación de biomasa de las especies vegetales de altitudes elevadas (Coomes y Allen 2007). Lo anterior dependerá de la tolerancia de las especies, su variabilidad genética, las historias de vida y la competencia intra e inter-específica de cada individuo (Dukes y Mooney 1999).

Debido a los cambios en las condiciones climáticas de la base a la cima de las montañas, la altitud juega un papel importante en el crecimiento de los árboles, limitando la productividad primaria de los ecosistemas conforme aumenta la elevación (Liang *et al.* 2010). Mendoza y Galicia (2010), determinaron la biomasa de pinales en parcelas con diferente manejo en Cofre de Perote Veracruz, en un gradiente altitudinal 2 550 a 3 860 m, sugieren un aumento de la biomasa entre los 2 550 a 2 900 m (126.74 y 218.33 Mg ha<sup>-1</sup>) en parcelas de reforestación de la especie *Pinus sp.*, y una disminución de la biomasa en bosques maduros de *Pinus hartwegii* que se estableció en la cima de las montañas a 3 860 m (295.92 Mg ha<sup>-1</sup>). Miyajima y Takahashi (2007) mencionan que en los bosques templados de Japón al contrario de lo que ocurre en los bosques tropicales, la altura de los árboles y la biomasa no disminuyen conforme la altitud aumenta, sin embargo estas características si se ven mermadas cuando las mediciones de estas variables se aproximan al límite vegetacional de las montañas (2 500 m). El decremento de la altura y de la biomasa sobre la línea límite se debe a que el periodo de crecimiento en las cimas de las montañas es menor (Miyajima y

Takahashi 2007). Alves *et al.* (2010) proponen que lo anterior puede ser a que la máxima elevación del gradiente altitudinal estudiado está por debajo del promedio del límite de las montañas tropicales que es aproximadamente entre 1 000 y 1 500 m. Por otro lado en México los gradientes de altitudes de latitudes medias son mayores a los estudiados por ejemplo por Miyajima y Takahashi (2007) de latitudes superiores en donde su límite arbóreo esta a 2 500 m. A pesar de esto, los bosques templados de México han sido poco estudiados, en gran parte del territorio nacional se considera que representan sitios importantes de almacenaje de carbono, sin embargo no hay datos suficientes para determinar fielmente si los sistemas montañosos podrían actuar como un sumidero de carbono.

La cuantificación de la biomasa y carbono; es una herramienta para la implementación de estrategias de mitigación y manejo forestal sustentable. Sin embargo; se ha observado que las determinaciones de los almacenes pueden variar hasta en un 25% debido a las distintas formas de estimación de la biomasa (Chave *et al.* 2004). La disminución de estos sesgos por medio de la aplicación de factores de corrección, se ha señalado que garantizan una mayor concordancia entre los valores observados y los predichos por los modelos generados para estimar la biomasa; además, de aumentar la precisión en la cuantificación de la biomasa (Chave *et al.* 2004). Una aproximación más certera de la biomasa de las especies templadas, entre los diferentes intervalos altitudinales en los que se distribuyen, asegurarán generar deducciones sobre el comportamiento de ésta frente a los actuales cambios ambientales. Por lo anterior, el objetivo de este estudio es: (1) evaluar la biomasa arbórea y los almacenes de carbono en tres especies vegetales en un gradiente altitudinal en bosques de alta montaña en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

## 6. Métodos

### 6.1. Sitio de estudio

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan cuenta con una superficie de 45 097 ha y se localiza entre las siguientes coordenadas geográficas: al norte 98° 40' 18" y 19° 28' 2"; oeste 98° 46' 40" y 19° 20' 29"; este 98° 37' 28" y 19° 16' 16"; sur 98° 40' 27" y 19° 14' 36". La Faja Volcánica Transmexicana es una Sierra de volcanes activos e inactivos que forman el borde austral de la placa Mexicana. Atraviesa México en dirección oeste-este en la latitud aproximada de los 19°00' a 21°00', mide 930 Km de largo y 120 Km de ancho representando el 9% del territorio nacional. La mayoría de la región ha sido formada por vulcanismo relacionado con la subducción de pequeñas placas por debajo de la norteamericana, la topografía se caracteriza por múltiples conos de ceniza volcánicos, cuyo rango altitudinal varía entre los 1,500 y 2,500 m (Ferrusquía-Villafranca, 1993; Bobbink & Heil, 2003). El intervalo altitudinal va desde los 2 500 m hasta los 5452 m. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación con más de 21 000 ha<sup>-1</sup> de bosque conservado, sino también en la diversidad de su flora y fauna (CONANP 2011).

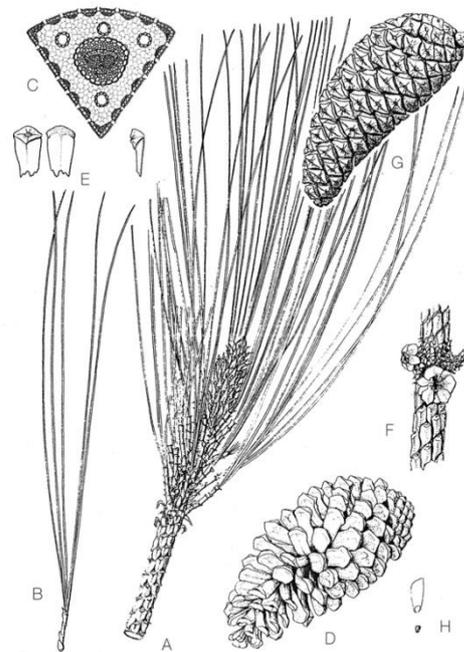
Según Heil *et al.* (2003) el clima de la región tiene una estación de lluvias en verano (mayo – octubre) y una de secas en invierno (noviembre – abril); la precipitación promedio anual es 1 000 mm, la temperatura oscila entre 10 y 15° C promedio anual, la humedad está claramente relacionada con la altitud y con la orientación de los volcanes. Los tipos de climas que se registran son templado-húmedo, frío y muy frío (Cw). Se pueden distinguir los bosques de coníferas como la vegetación dominante. A partir de los 3 5000 m se establece el bosque de *Pinus hartwegii*, el oyamel tiene un rango altitudinal de los 3 000 m hasta los 3 550 m y *Pinus montezumae* se encuentra desde los 3 000 m hasta los 3 500 m de altitud en asociaciones entre *Quercus* y *Abies*. Los suelos del Izta-Popo en general están formados sobre materiales volcánicos viejos y jóvenes. Los más importantes en el área son los Andosoles, Regosoles y Litosoles. El pH de estos suelos es ligeramente ácido 5-7 con una alta saturación de bases y acumulación de materia orgánica en la capa más superficial.

## 6.2. Características de las especies arbóreas seleccionadas

Las especies muestreadas son dominantes en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, las variaciones climáticas a lo largo del gradiente altitudinal determina el tipo de vegetación que se establecen. Cada árbol elegido tiene requerimientos ambientales diferentes que se adaptan a la disponibilidad de recursos a lo largo de las isotermas del parque formando masas monoespecíficas bien delimitadas.

### *Pinus montezumae* Lamb.

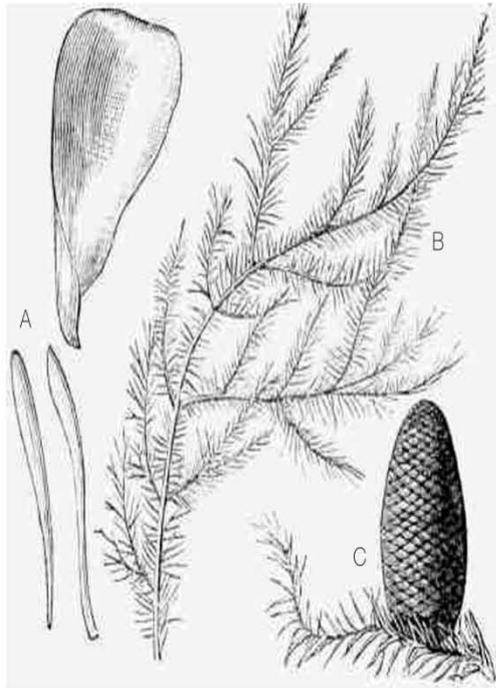
Árboles de 25 a 30 metros, con un diámetro normal DN de 50-90 cm, de crecimiento rápido a moderado. Perennifolios, floración de febrero a abril. Se les puede encontrar con asociaciones con bosques de *Quercus* y de otras coníferas. Se distribuyen entre los 1 150 m y los 3 550 m, en suelos principalmente de tipo Cambisol, moderadamente profundos, no pedregosos, bien drenados, ricos en materia orgánica (MO) y con pH que va desde 5-7. Ubicados en las mesetas y pendientes de las montañas. La temperatura media de crecimiento está entre los 8 y los 24 °C, con una precipitación que va desde los 900 mm – 1 300 mm anuales (Modificado de ficha técnica CONAFOR 2012).



A. Rama con hojas aciculadas y cono terminal. B. Hoja. C. Sección de una hoja. D. Cono femenino. E. Semilla. F. Rama con remanentes de conos. G. Cono masculino. H. Hoja con ala (Farjon y Styles 1997).

***Abies religiosa*(HBK) Schl. Et Cham**

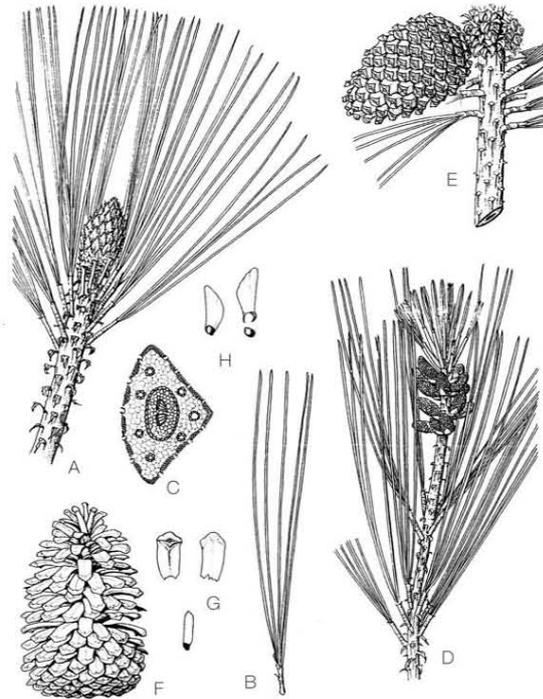
Los árboles de esta especie llegan a tener hasta 40 m de altura y en ocasiones hasta 60 m, con un diámetro normal de hasta 180 cm. Son perennifolios con flores desarrolladas en diciembre. Forman asociaciones con otras coníferas, aunque también pueden formar grandes masas boscosas monoespecíficas que son llamadas Bosques de abetos o de oyamel. Crecen a una altitud entre 2 400 m y hasta los 3 550 m. Crece en Andosoles, generalmente profundos aunque también en suelos someros, muy ricos en materia orgánica (MO), bien drenados y húmedos, en un rango de pH de 5 a 7. La temperatura óptima para el crecimiento de la especie se encuentra entre los 7 °C a 15 °C, con una precipitación anual máxima de 1 300 mm (Modificado de ficha técnica CONAFOR 2012).



A. Semillas. B. Rama con hojas aciculares.  
C. Cono reproductivo. (Coníferas de México 2011).

*Pinus hartwegii* Lindl.

Este pino es una de las especies que desarrolla alturas entre 15 – 30 m, su diámetro generalmente no sobrepasa de los 60 cm. Forman grandes masas boscosas en el límite de vegetación en las montañas. La altitud promedio en la que se establecen varía entre los 3 000 m y 4 200 m, en suelos Regosol y Andosol; poco profundos, volcánicos ricos en materia orgánica, con buen drenaje. Toleran temperaturas de -5 °C a 17 °C con precipitaciones entre los 900mm y 1 100 mm anuales (Rzedowski 2006).



A. Rama con hojas aciculares. B. Hoja. C. Corte de una hoja. D. Rama con hojas y estróbilos. E. Cono masculino. F. Cono femenino. G. Semillas. H. Semillas con alas (Farjon y Styles 1997).

### 6.3 Diseño de muestreo

#### 6.3.1. Estimación de la biomasa arbórea y de los almacenes de carbono

Para cada una de las tres especies (*Pinus montezumae*, *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*) se determinó una zona de distribución baja y alta, lo cual nos permitió comparar la biomasa a través de un gradiente altitudinal de establecimiento. Para cada piso elevacional (bajo y alto) se muestrearon al azar cinco cuadros de 25 x 25 m separados más de 50 m uno de otro, para tener un total de 10 cuadros por especie. Los cuales no presentaron evidencia de disturbio y eran mono-específicos; es decir, no se observó alguna especie arbórea diferente a la estudiada por cuadrante (cuadro 1). En cada caso se midieron todos los individuos arbóreos vivos > 2.5 cm de diámetro normal (DN) y > 1.3 m de altura. Posteriormente en gabinete se estimó a nivel de cuadro la densidad de la madera, el área basal, la biomasa aérea y los almacenes de carbono de cada uno (cuadro 2).

La biomasa se cuantificó por medio de ecuaciones alométricas obtenidas previamente para las mismas especies de la bibliografía, seleccionadas bajo los criterios de semejanza de sitios y ambientes (cuadro 2). Las ecuaciones utilizadas se generaron en las zonas de Texcoco, estado de México para *P. montezumae* (Bonilla 2009), de Tlaxcala para *A. religiosa* (Avendaño *et al.* 2009) y del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, estado de México para la especie *P. hartwegii* (Jiménez 2010). Los datos de las densidades de la madera de las especies se obtuvo de los estados de Hidalgo para *P. montezumae* (Zamora-Campos *et al.* 2007); Michoacán para *A. religiosa* (Goche-Télles *et al.* 2000) y del Distrito Federal para la especie *P. hartwegii* (Espinosa 2005). Así mismo, se aplicaron tres diferentes factores de corrección a las estimaciones de biomasa por medio de ecuaciones alométricas; “quasi-maximum likelihood estimator” (QMLE), “smearing estimate” (SE) y “ratio estimator” (RE) (Smith 1993), los cuales se compararon con la biomasa sin factor de corrección para determinar la diferencia entre la determinación de biomasa por medio de los factores y la biomasa determinada sin factor de corrección. Los capitales de C de la vegetación se calcularon por la multiplicación de la masa de la vegetación por la concentración de C (0.5) (IPCC 2001).

### 6.3.2. Análisis de datos

Los análisis de regresión lineal y análisis de varianzas se utilizaron para determinar las diferencias en la biomasa a diferentes de cada especie a diferentes altitudes, el error estándar y  $R^2$  para la variación de la biomasa entre los factores de corrección o sin factores de corrección. Lo anterior se realizó con los programas Statistica 8 e Intercooled Stata 9.1®.

Cuadro 1. Coordenadas, altitud y orientación las zonas de muestreo seleccionadas

Bosque	Zonas altitudinales de muestreo		
	Coordenadas	Altitud (m)	Orientación
<i>Pinus montezumae</i> (Pm)	19°5'3.76, 98°35'2.97	3 100	E-O
	19°20'15.98, 98°43'28.59	3 200	S-N
<i>Abies religiosa</i> (Ar)	19°5'30.27, 98°40'52.78	3 300	E-O
	19°16'51.15, 98°40'29.40	3 400	S-NE
<i>Pinus hartwegii</i> (Ph)	19°17'28.35, 98°41'25.22	3 300	S-N
	19°5'3.52, 98°39'47.57	3 600	E-O

Cada una de las especies está representada en dos diferentes altitudes dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Pm y Ar tuvo 1 00 m de diferencia entre pisos elevacionales, mientras Ph 3 00 m.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas y de densidad de la madera para estimar la biomasa arbórea utilizadas en los sitios de estudio.

Especie	Ecuaciones y localidad
<i>Pinus montezumae</i>	$Y = 0.013 (DN)^{3.046}$ Intervalo DN 7-66 cm $\ln Y = -4.340 + 3.046 (\ln (DN))$ , Texcoco <sup>1</sup> Densidad = 0.418 g / cm <sup>3</sup> Hidalgo <sup>2</sup>
<i>Abies religiosa</i>	$Y = 0.0713 (DN)^{2.5104}$ Intervalo DN 10-79 cm $\ln Y = -2.6404 + 2.5104 (\ln (DN))$ Tlaxcala <sup>3</sup> Densidad = 0.36 g/ cm <sup>3</sup> , Michoacán <sup>4</sup>
<i>Pinus hartwegii</i>	$Y = 0.0635 (DN)^{2.472}$ Intervalo DN 3-58 cm $\ln Y = -2.756 + 2.42 (\ln (DN))$ Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan <sup>5</sup> Densidad = 0.496 g/ cm <sup>3</sup> Distrito Federal <sup>6</sup>

Las ecuaciones alométricas y de densidad fueron tomadas de diferentes estados con ambientes similares. (1) Bonilla (2009); (2) Zamora-Campos *et al.* (2007); (3) Avendaño (2009); (4) Goche-Télles *et al.* (2000); (5) Jiménez (2010); (6) Espinosa (2005).

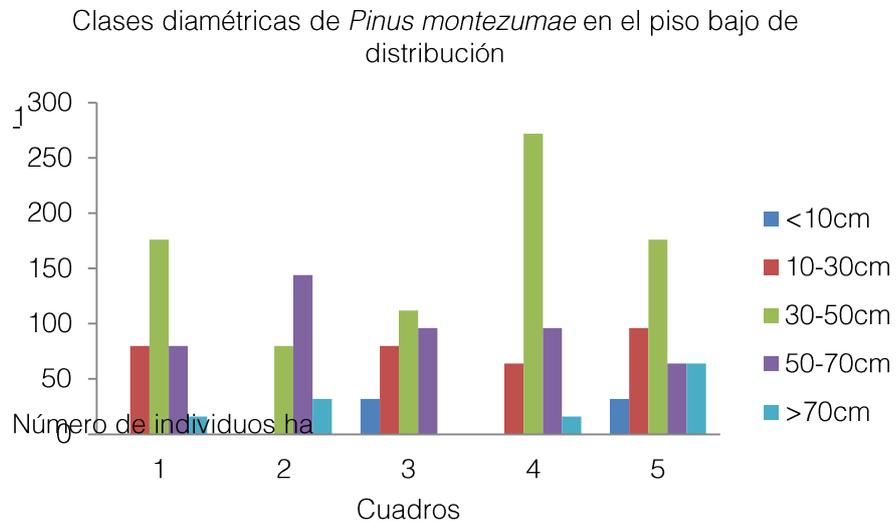
## 7. Resultados.

### 7.1. Estimación de la biomasa arbórea y los almacenes de carbono.

#### 7.1.1. Estructura arbórea

A partir de aquí se utilizó la denominación de piso bajo para los cuadros muestreados en el piso no elevado y piso alto para los cuadros elevados de cada especie. La distribución de las clases diamétricas de *P. montezumae* forma una distribución normal e indica que la población del piso bajo (3 100 m) tiene la mayor cantidad de individuos en la clase intermedia 30 - 50 cm (44%), seguidos de < 10 cm que posee el 3.5% de la distribución y los adultos con diámetros > 70 cm sólo el 7% (64 y 128 individuos por hectárea respectivamente). En este piso, el área basal y la altura están determinadas por las clases diamétricas > 50 cm. El área basal es 20 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> mayor (40.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y la altura seis metros mayor que el piso alto (20 m). La densidad del piso bajo es 60% menor que en piso alto de la especie (364y 1814 individuos ha<sup>-1</sup>) (figura 1a). En contraste; la población del piso alto de *P. montezumae* es heterogénea y sesgada hacia las primeras clases. Los individuos arbóreos se encuentran sólo en las clases diamétricas: 10 cm (25%), 10-30 cm (72%) y 30-50 cm (3.3%). Para las últimas dos categorías (50-70 cm y >70 cm) no se registró ningún ejemplar. La abundancia de árboles en clases pequeñas remarca la falta individuos adultos de la población; sin embargo puede ser indicio de un reclutamiento y escalonamiento de la especie hacia sitios más elevados (cuadro 2, figura 1b).

(a)



(b)

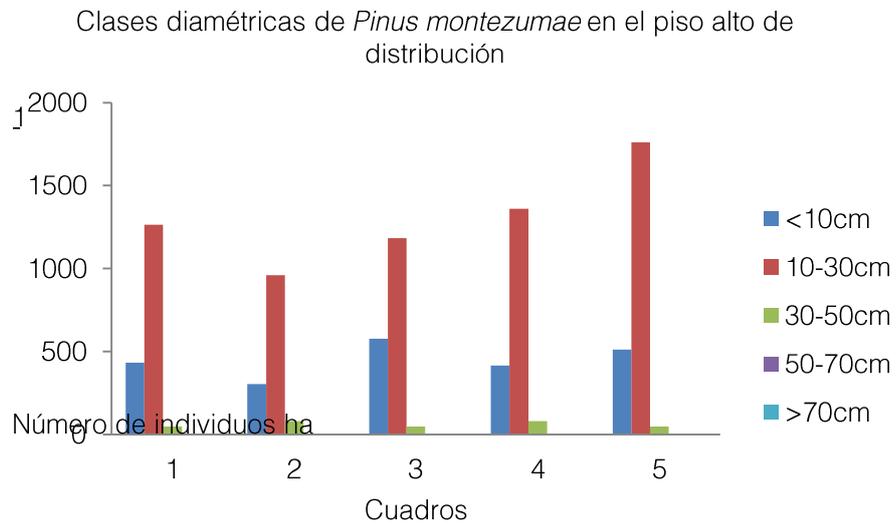
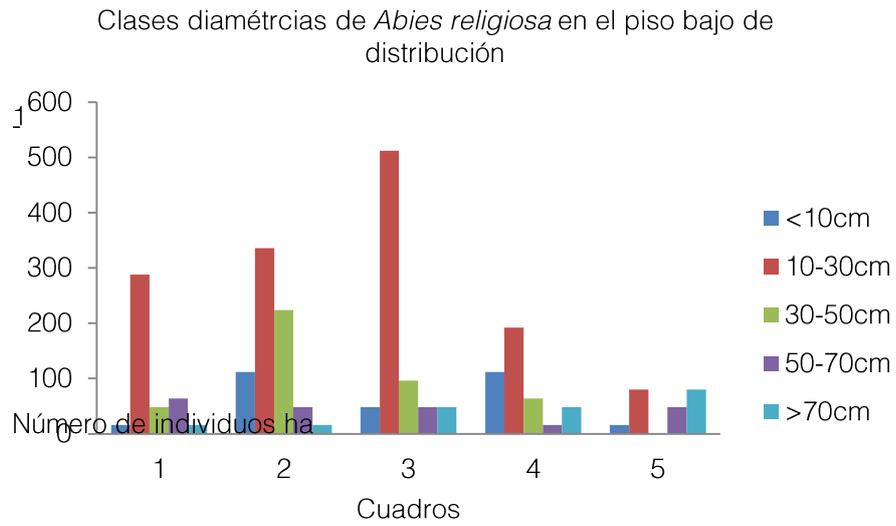


Figura 1. Estructura diamétrica de *P. montezumae* en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. (a) piso bajo (3 100 m) y (b) piso alto (3 200 m).

*A. religiosa* del piso bajo (3 300 m) tuvo el 54.6% en la categoría de 10-30 cm (1408 individuos) y el 16.7% en la clase 30-50 cm (432 individuos). La densidad disminuyó en las categorías externas, 11.8% para la primer categoría (10 cm, 304 individuos), 8.7% para 50-70 cm y 8% para los individuos >70 cm. La densidad se incrementó 4.8% en relación con el piso alto (2576 y 2336 individuos ha<sup>-1</sup>) (3 400 m); asimismo, la mayor parte son individuos jóvenes y delgados, siendo menor el área basal 19 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> respecto al piso alto (52.55 y 71.04 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) a la vez que la altura promedio no supera los 19 m (figura 2a). Por otro lado, la población del piso alto, condensa el 54% de sus individuos (1280) en la clase 30-50 cm y el 21.23% en la categoría 10-30 cm (496 árboles). El censo en las distribuciones 10-30 cm y de 30-50 cm en los dos pisos sugiere que no hay reclutamiento para la categoría de 10 cm en el piso bajo 2% y 11.8% en piso alto, ni tampoco hay un número mayor de rodales de >70 cm (5.4% y 8.1%), es decir, la población es joven. Sin embargo; los árboles con diámetros de 50-70 cm (16.4%), eventualmente actúan sobre la altura proyectándola 10 m más que su distribución inferior (28 m y 18 m) (cuadro 2, figura 2b).

(a)



(b)

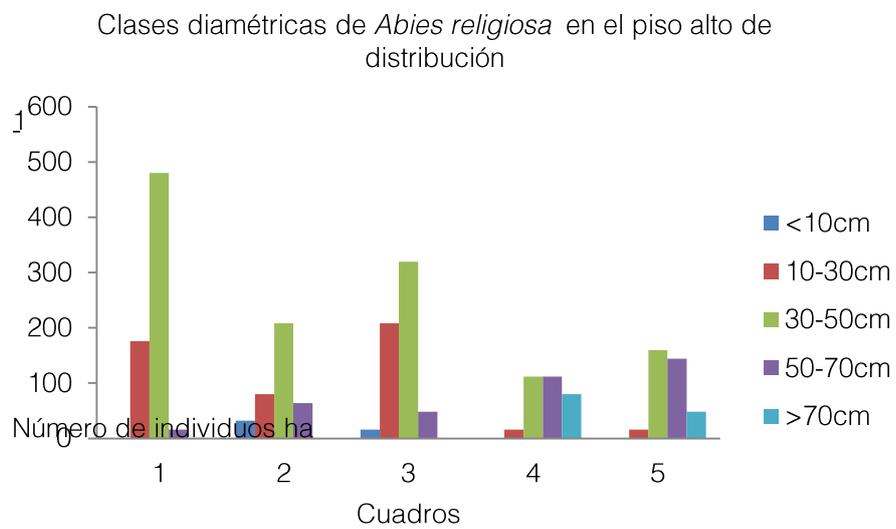
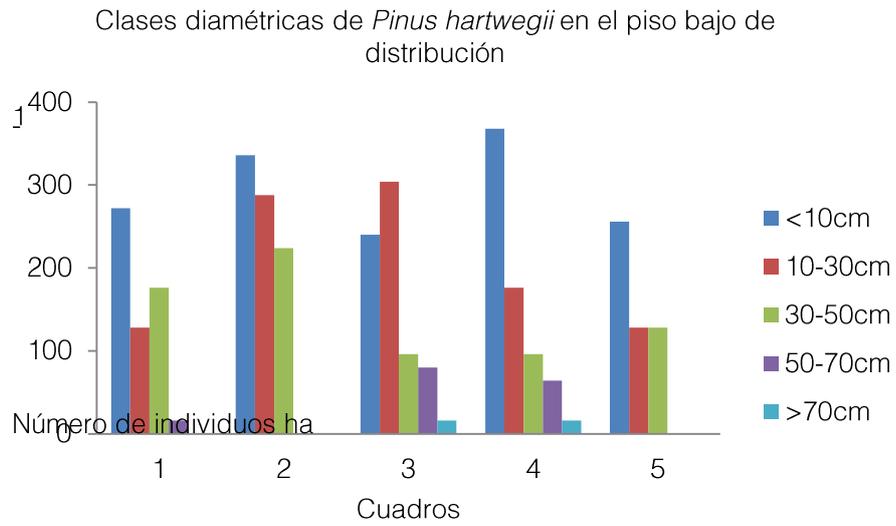


Figura 2. Estructura diamétrica de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, el piso bajo (a) (3 300m) y en el piso alto (b) (3 400 m).

*P. hartwegii* en el piso bajo (3 300 m) es una población en regeneración: 43.19% de los individuos son < 10 cm de DN, 30.04% a 10-30 cm de DN, y el 21.12% a los individuos medios 30-50 cm de DN. La densidad es 50% mayor que su piso alto (681 y 224 individuos ha<sup>-1</sup>) (3 600 m) y el área basal sólo varía en un 1% (35.61 y 34.77 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); en contraste existe una diferencia de ocho metros en la altura siendo mayor en el piso alto (21 y 13 m) (figuras 3a y b, cuadro 4). En el piso alto el establecimiento de nuevos individuos en la zona alta es nulo (10 cm, cero individuos), pero la densidad aumentó conforme los árboles aumentaron de tamaño. En la categoría 10-30 cm se concentró el 24.28% y aumentó al doble en la clase 30-50 cm (48.57%). En los individuos más anchos, la población se redujo 28% y un 10% en los individuos >70 cm (224 y 80 individuos) (cuadro 2, figura 3b), es decir los individuos próximos a la línea vegetacional son árboles viejos y escaso establecimiento.

A lo largo del continuo altitudinal a través de los intervalos donde la densidad de cada una de las especies arbóreas descritas es mayor; resalta un avance altitudinal de establecimiento de la especie *P. montezumae* a las faldas de la montaña, la homogeneidad de las áreas de muestreo de *A. religiosa* y la baja densidad de los individuos en las clases diamétricas pequeñas de *P. hartwegii* en la cima. Además, las mayores alturas y áreas basales, coincidieron con las mayores densidades de individuos adultos de *P. montezumae* y *A. religiosa*. Esto último, con excepción de *P. hartwegii* donde encontramos el efecto contrario, la mayor área basal está determinado en el piso bajo donde predominan individuos jóvenes.

(a)



(b)

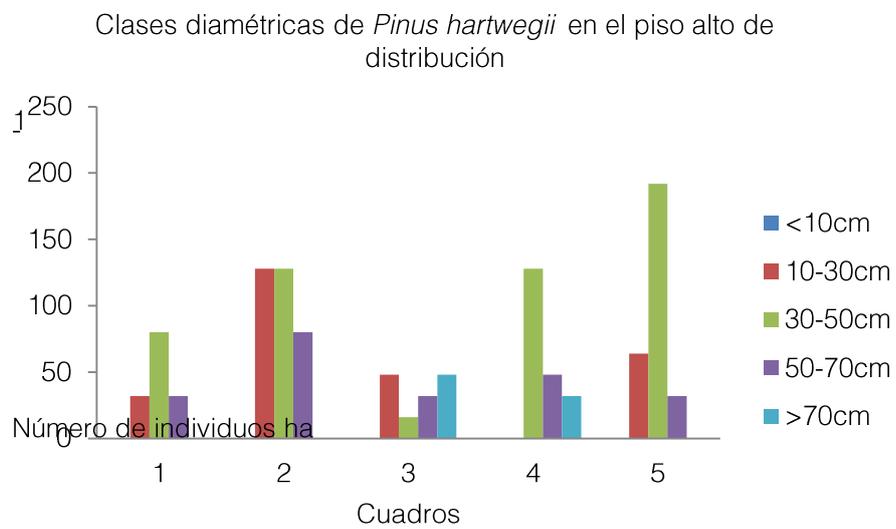


Figura 3. Densidad de individuos arbóreos por clases diamétricas (a) en el piso bajo de distribución de la especie *Pinus hartwegii* (3 300 m) y para el piso alto (3 600 m) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

Cuadro 3. Características dasométricas de tres especies de pinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

	Altitud (m)	Cuadro	No. Ind. 625 m <sup>2</sup>	Altura (m)	Densidad arbórea (ha <sup>-1</sup> )	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	
<i>Pinus montezumae</i>	3 100	1	23	18.59	368	55.92	
		2	16	25.12	256	68.83	
		3	20	16.2	320	43.32	
		4	28	21.85	448	63.46	
		5	27	22.5	432	76.14	
		$\bar{x}$		22.8±5	20.85±3.5	364.8±79	61.5±12
	3 200	1	109	15.82	1744	42.6	
		2	84	17.52	1344	35.06	
		3	113	13.54	1808	36.97	
		4	116	12.59	1856	42.07	
		5	145	12.64	2320	45.91	
	$\bar{x}$		113.4±21	14.42±2.1	1814.4±347	40.5±4.4	
<i>Abies religiosa</i>	3 300	1	27	12.74	432	37.18	
		2	46	15.9	736	53.91	
		3	47	17.91	752	62.46	
		4	27	18.07	432	46.83	
		5	14	25.5	224	62.35	
		$\bar{x}$		32.2±14	18.02±4.7	515.2±225.5	52.55±10.8
	3 400	1	42	27.71	672	67.09	
		2	24	24.83	384	45.88	
		3	37	24.75	592	60	
		4	20	30.95	320	88.78	
		5	23	33.3	368	93.47	
	$\bar{x}$		29.2±9.7	28.31±3.7	467.2±155	71.04±20	
<i>Pinus hartwegii</i>	3 300	1	37	12.7	592	33.73	
		2	53	13.4	848	31.09	
		3	46	13.5	736	48.99	
		4	45	13.26	720	43.05	
		5	32	13.71	512	21.18	
		$\bar{x}$		42.6±8	13.31±0.4	681.6±131	35.61±11
	3 600	1	9	15.78	144	21	
		2	21	14.4	336	42.3	
		3	9	22	144	32.67	
		4	13	38	208	45.16	
		5	18	16.1	288	32.74	
	$\bar{x}$		14±5.4	21.26±10	224±86	34.77±9.5	

En el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan las mayores densidades estuvieron en los pisos bajos de Ar y Ph mientras que la mayor densidad se encontró en el piso alto de Pm; Ph y Ar registraron las mayores alturas en los pisos altos al contrario de lo determinado en Pm. Por otro lado el área basal fue mayor en el piso bajo de Pm y Ph mientras que para Ar en el piso alto fue mayor.

### 7.1.2. Distribución de la biomasa arbórea y del carbono

En los bosques templados del Parque Nacional Izta-Popo la biomasa por componentes se determinó sin utilizar los factores de corrección para la especie *Pinus montezumae* y los pisos bajos de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, mientras que para los pisos altos de *A. religiosa* y *P. hartwegii* se utilizó el factor QMLE. El 65 y 73% de la biomasa total de las especies se encontró en el fuste, sin embargo, la distribución de la biomasa de ramas y follaje varió respecto a cada especie: *P. montezumae* poseyó la misma distribución de biomasa en las ramas y el follaje (9%), *A. religiosa* asignó un 1.8% más al follaje que a las ramas (8.7% y 7% respectivamente) y *P. hartwegii* tuvo 23.8% de su biomasa en las ramas y 10.9% al follaje (cuadro 4).

La biomasa de la especie *P. montezumae* en el piso bajo (3 100 m) fue de  $416.5 \pm 1.6$  Mg ha<sup>-1</sup> y en el piso alto (3 200 m) de  $165 \pm 0.1$  Mg ha<sup>-1</sup> existiendo una diferencia significativa entre los pisos de muestreo ( $p < 0.01$ ) (cuadro 5). La biomasa excluida del intervalo válido de DN de las ecuaciones alométricas para el piso bajo fue de 0.3% y 1.7% en el piso alto. La mayor cantidad de carbono se concentró en el piso bajo ( $208.3 \pm 1.0$  Mg C ha<sup>-1</sup>), en relación al piso alto ( $82.5 \pm 0.5$  Mg C ha<sup>-1</sup>) (figura 4).

*A. religiosa* tuvo  $190.3 \pm 0.4$  Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa en el piso alto (3 400 m) y para el piso bajo  $115.3 \pm 1.1$  Mg ha<sup>-1</sup> (3 300 m), la cual presentó diferencias significativas entre la biomasa de los pisos ( $p < 0.01$ ) (cuadro 6). Los individuos que no se contemplaron para el intervalo de uso de las ecuaciones contuvieron el 60% de la biomasa excluida en el piso bajo y el 15% del piso elevado. El mayor almacén de carbono aéreo estuvo en el piso alto ( $95.1 \pm 0.3$  Mg C ha<sup>-1</sup>) y  $57.7 \pm 0.5$  Mg C ha<sup>-1</sup> en el piso bajo) (figura 4).

La biomasa total de *P. hartwegii* fue en el piso bajo  $125.6 \pm 0.3$  Mg MS ha<sup>-1</sup> (3 300 m) y  $41.2 \pm 0.3$  Mg MS ha<sup>-1</sup> en el piso alto (3 600 m) (cuadro 7). Asimismo, en el piso bajo se determinó una mayor concentración de carbono en relación al piso alto ( $62.8 \pm 0.3$  Mg C ha<sup>-1</sup> y  $20.6 \pm 0.3$  Mg C ha<sup>-1</sup>) (figura 4). Esta especie descartó el 19% de biomasa arbórea en las zonas bajas y el 38% en las zonas altas respecto a la cuantificada por medio de alometría.

En general se distingue la disminución de la cantidad de biomasa conforme la altitud aumenta en los bosques templados. *P. hartwegii* y *P. montezumae* tuvieron un mayor biomasa arbórea aérea y carbono en los pisos bajos; en contraste se determinó que la especie *A. religiosa* albergó la mayor cantidad de biomasa y carbono en el piso alto. Por otro lado; la determinación de la biomasa que no se incorporó en la cuantificación por medio de ecuaciones alométricas varió entre especies; mientras que en *A. religiosa* se eliminó el 60%, en *P. montezumae* no fue mayor del 2%. Además, la biomasa determinada en los compartimientos arbóreos en cada especie fue diferente: *P. hartwegii* tuvo la mayor variación entre los componentes (13%), en contraste las especies *A. religiosa* y *P. montezumae* la diferencia fue menor al 2% en la biomasa de follaje y ramas.

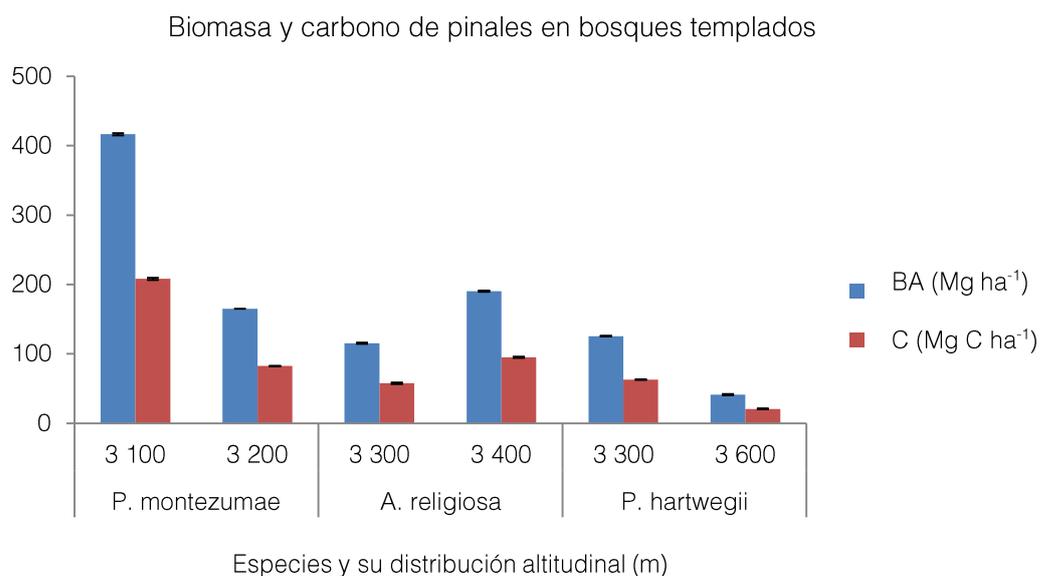


Figura 4. La biomasa arbórea (BA, barras azules) y almacén de carbono (C, barras rojas) aéreas de tres especies de pinales en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Las líneas verticales indican  $\pm$  EE.

Cuadro 4. Biomasa arbórea y almacenes de carbono por componente (fuste, ramas y follaje) en tres especies de pinales en don pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

	Altitud (m)	Componente arbóreo	Mg MS ha <sup>-1</sup>	Mg C ha <sup>-1</sup>
<i>Pinus montezumae</i> <sup>1</sup>	3 100	fuste 73%	304	152
		ramas 9%	37.5	19
		follaje 9%	37.5	19
	3 200	fuste 73%	120.5	60
		ramas 9%	15	7.4
		follaje 9%	15	7.4
<i>Abies religiosa</i> <sup>2</sup>	3 300	fuste 81.3%	94	47
		ramas 7%	8	4
		follaje 9%	10	5
	3 400	fuste 81.3%	155	77
		ramas 7%	13.13	6.6
		follaje 9%	16.3	8.1
<i>Pinus hartwegii</i> <sup>3</sup>	3 300	fuste 65.3%	82	41
		ramas 23.8%	29.9	15
		follaje 10.9%	113.7	6.8
	3 600	fuste 65.31%	26.9	13.5
		ramas 23.79%	9.8	5
		follaje 10.89%	4.5	2.2

(1) Bonilla (2009); (2) Avendaño *et al.* (2009); (3) Jiménez (2010).

Cuadro 5. Biomasa arbórea sin factor de corrección y con factores de corrección para la especie *Pinus montezumae* en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

	Altitud (m)	Cuadro	FC			BA (-) FC	BA (+) FC		
			QMLE	SE	RE		QMLE	SE	RE
<i>Pinus montezumae</i>	3 100	1	1.7	1.5	1.4	392.6 ± 3.8	456.7 ± 4.4	591.0 ± 5.7	555.9 ± 5.4
		2				466.5 ± 4.6	542.6 ± 5.4	702.2 ± 6.9	660.5 ± 6.5
		3				345.4 ± 3.7	401.7 ± 4.3	519.8 ± 5.6	489 ± 5.2
		4				498.2 ± 2.5	579.5 ± 3	749.9 ± 3.8	705.4 ± 3.6
		5				380.1 ± 3.4	442.1 ± 3.9	572.1 ± 5	538.1 ± 4.7
						<b>416.5 ± 1.6</b>	482.5 ± 1.9	626.9 ± 2.4	589.8 ± 2.3
	3 200	1	1.3	1.8	1.8	178.2 ± 0	241.2 ± 0.3	332.7 ± 0.4	321.9 ± 0.4
		2				155.6 ± 0.3	210.6 ± 0.4	290.5 ± 0.6	280.1 ± 0.5
		3				149.7 ± 0.6	202.7 ± 0.3	279.5 ± 0.5	270.4 ± 0.4
		4				173.3 ± 0	234.6 ± 0.3	323.6 ± 0.4	313 ± 0.4
5					168.2 ± 0.1	227.7 ± 0.2	314 ± 0.3	303.8 ± 0.2	
					<b>165 ± 0.1</b>	223.4 ± 0.1	308 ± 0.2	298 ± 0.2	

Las letras en negritas indican los valores con menor error en la determinación de biomasa. Biomasa determinada sin factor de corrección (BA (-) FC), biomasa cuantificada agregando alguno de los tres factores de corrección establecidos (BA (+) FC), como “Quasi-maximum likelihood estimator” (QMLE), “Smearing estimate” (SE), “Ratio estimator” (RE), factores de corrección (FC).

Cuadro 6. Biomasa arbórea sin utilizar el factor de corrección y con factores de corrección para la especie *Abies religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan en dos pisos altitudinales.

	Altitud (m)	Cuadro	FC			BA (-) FC	BA (+) FC		
			QMLE	SE	RE		QMLE	SE	RE
<i>Abies religiosa</i>	3 300	1	1.6	2.3	2.3	247.8 ± 2.9	400.2 ± 4.7	564.3 ± 6.7	570.7 ± 6.7
		2				237.1 ± 1.1	383.3 ± 1.8	540.6 ± 2.5	546.7 ± 2.5
		3				287.7 ± 1.8	464.9 ± 2.9	655.6 ± 4.1	663.0 ± 4.2
		4				167.9 ± 3.4	271.3 ± 5.6	382.5 ± 7.9	386.9 ± 8
		5				157.4 ± 6.8	358.1 ± 10.9	358.3 ± 15.4	362.3 ± 15.6
						<b>115.3 ± 1.1</b>	372.6 ± 1.8	525.4 ± 2.6	531.4 ± 2.6
	3 400	1	0.5	1.2	1.3	391.5 ± 0.7	201.5 ± 0.4	480.5 ± 0.9	488.3 ± 1
		2				291.5 ± 2	149.9 ± 1	357.6 ± 2.5	363.3 ± 2.5
		3				360.8 ± 1.1	185.6 ± 0.6	442.6 ± 1.4	449.8 ± 1.4
		4				405.6 ± 4	208.4 ± 2.1	497.1 ± 4.9	505.1 ± 5
5					400.5 ± 2.4	205.9 ± 1.2	491 ± 2.9	498.9 ± 2.9	
					370 ± 0.9	<b>190.3 ± 0.4</b>	453.8 ± 1.1	461.1 ± 1.1	

Las letras en negritas indican los valores con menor error en la determinación. Biomasa arbórea sin factor de corrección (BA (-) FC), biomasa utilizando factores de corrección (BA (+) FC), factores de corrección (FC), "Quasi-maximum likelihood estimator" (QMLE) cuantificó más certeramente la biomasa. Determinación "Smearing estimate" (SE), "Ratio estimator"(RE).

Cuadro 7. Biomasa arbórea sin factor de corrección y biomasa utilizando los factores de corrección para la especie *Pinus hartwegii* en dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

	Altitud (m)	Cuadro	FC			BA (-) FC	BA (+) FC		
			QMLE	SE	RE		QMLE	SE	RE
<i>Pinus hartwegii</i>	3 300	1	4.40	4.82	5.51	123.8 ± 0.8	452.1 ± 2.8	492.8 ± 3.1	113.0 ± 3.5
		2				127.6 ± 0.5	469.8 ± 1.7	512.1 ± 1.8	117.5 ± 2.1
		3				141.2 ± 0.8	515.6 ± 2.9	562.1 ± 3.1	128.9 ± 3.6
		4				144.7 ± 0.9	525.1 ± 3.4	572.4 ± 3.7	41.0 ± 4.2
		5				90.5 ± 0.7	331.7 ± 2.5	361.6 ± 2.7	82.9 ± 3.1
						<b>125.6 ± 0.3</b>	458.9 ± 1.2	500.2 ± 1.3	573.7 ± 1.5
	3 600	1	0.49	1.23	1.48	75.7 ± 2.6	30.7 ± 1.0	76.4 ± 2.6	91.9 ± 3.1
		2				152 ± 1.5	62 ± 0.6	154 ± 1.4	185.3 ± 1.7
		3				57.8 ± 3.3	23.4 ± 1.3	58.3 ± 0.2	70.1 ± 0.2
		4				116.4 ± 1.5	47.3 ± 0.6	117.5 ± 1.5	141.4 ± 1.7
5					103.5 ± 0.6	42.6 ± 0.2	105.8 ± 0.6	127.3 ± 0.7	
					101.1 ± 0.7	<b>41.2 ± 0.3</b>	102.4 ± 0.7	123.2 ± 0.9	

Biomasa sin factor de corrección (BA (-) FC), biomasa arbórea agregando el factor de corrección (BA (+) FC).el factor de corrección (FC), “Quasi-maximum likelihood estimator” (QMLE), “Smearing estimate” (SE) y “Ratio estimator”(RE). Las letras en negritas indican la determinación de biomasa con menor error.

### 7.1.3. Determinación de la biomasa arbórea por medio de ecuaciones alométricas usando factores de corrección

Los factores SE (“smearing estimate”) y RE (“ratio estimator”) fueron los menos precisos en la estimación de la biomasa así como los que más sobreestimaron la biomasa en este bosque templado en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. El factor QMLE (“Quasi-maximum likelihood estimator”) y la biomasa sin ajuste explicaron mejor las variaciones de la biomasa; además de ser los que brindaron la determinación más fidedigna, por ser los que menor error presentaron en comparación con las demás determinaciones.

La biomasa sin tratamiento de *P. montezumae* presentó el mejor grado de correlación en comparación con los otros factores estudiados y con las demás especies ( $r > 0.66$  y  $R^2 > 0.95$ ;  $p < 0.01$ ) ( $\pm 0.08$ ). En el piso bajo, la correlación fue significativa y moderada con la biomasa sin factor de corrección ( $r > 0.30$  y  $R^2 > 0.95$ ;  $p = 0.04$ ). Además ninguno de los tratamientos de ajuste tuvo correlación con la biomasa en el piso alto ( $r > 0.12$  y  $R^2 > 0.16$ ;  $p = 0.08$ ). Las menores variaciones respecto a la media para los dos pisos se determinaron en la biomasa sin tratamiento ( $\pm 1.6$  y  $\pm 0.1$ , respectivamente) (cuadro 4).

*A. religiosa* no presentó una relación entre los tratamientos de corrección y la biomasa en el piso bajo ( $r > 0.1$  y  $R^2 > 0.01$ ;  $p = 0.70$ ). Opuesto a este piso, los factores de corrección en el piso alto si correlacionaron con la biomasa y los sitios con su ajustes ( $r > 0.43$  y  $R^2 > 0.18$ ;  $p < 0.01$ ). Los menores variaciones en la determinación se presentaron en la biomasa sin FC en el piso bajo ( $\pm 1.1$ ) y en QMLE en la zona alta ( $\pm 0.4$ ). De igual manera que para la especie *P. montezumae*, en el oyamel al incluir los dos pisos se generó una correlación significativa con la biomasa sin factor de corrección ( $r > 0.43$  y  $R^2 > 0.18$ ;  $p < 0.01$ ;  $\pm 1.01$ ) (cuadro 5).

Por último, la biomasa de la especie *P. hartwegii* fue tratada mediante estadística no paramétrica, por no cumplir con las condiciones de normalidad. Para los dos pisos, la biomasa sin factor de corrección tuvo mayor correlación sobre los factores propuestos ( $R^2 > 0.9$ ;  $p < 0.01$ ;  $\pm 0.5$ ). Sin embargo, el piso bajo fue más específico en la determinación de la biomasa cuando no

se utilizó el factor de corrección ( $\pm 0.3$ ); al contrario del piso alto donde el factor de corrección QMLE determinó con más certeza la biomasa ( $\pm 0.3$ ) (cuadro 6).

## 8. Discusión

### 8.1. Estructura arbórea

El crecimiento de las poblaciones de coníferas suele ser lento y la densidad bien distribuida en todas las categorías diamétricas (García 2000). En la población de *P. montezumae* en el piso bajo, predominaron individuos adultos y pocos juveniles. Una explicación del sesgo en la población puede ser el de las perturbaciones a las que están sometidos como la influencia de los poblados cercanos por el paso de las comunidades y el transporte de éstas (García 2000). En contraste, en el piso alto la dominancia de juveniles puede ser un indicativo del reclutamiento y éxito de establecimiento de *P. montezumae*, asegurando su sobrevivencia en altitudes más elevadas que las registradas hasta el momento para la especie; además, probablemente debido a que no están bajo las presiones antropogénicas. Los bosques de *A. religiosa* se encuentran delimitados en su límite altitudinal superior por la especie *P. hartwegii*. Bajo el estrato arbóreo de *P. hartwegii* hacia plántulas de *A. religiosa*, promoviendo su establecimiento y avance paulatino hacia las cimas de las montañas (García 2000).

La densidad individuos  $< 10$  cm de *P. montezumae* y *A. religiosa* es mayor los pisos altos que en los pisos bajos. Una posible explicación es que estas especies estén colonizando áreas en pisos más altos. Estos fenómenos de migración de especies a nuevos pisos altitudinales han sido reportados por diversos estudios. En bosques de latitudes medias debido a cambios en la fenología derivados de los aumentos de temperatura en verano, así como el deshielo de los glaciares de las montañas ha producido el ascenso vertical de las especies de pinales (Bertin 2008). En Bulgaria el límite vegetacional de las montañas Balkan se encontraba a 1 800 m, sin embargo para principios de este siglo se pueden encontrar individuos en etapas juveniles a más de 2 100 m (Meshivev *et al.* 2000). Mientras en América del Norte, Luckman y Kavanagh (2000)

observaron distintas respuestas de la vegetación al aumento de 1.5 °C en la temperatura. En el presente estudio, el establecimiento de las especies ocurre debido a una rápida colonización de los espacios que se encontraban por encima del límite vegetacional debido a un incremento en la temperatura en el ambiente del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (Islas 2011, Torres 2013). En el caso de *P. hartwegii*, conforme la plántula crece va adquiriendo más tolerancia a las nuevas condiciones ambientales, permitiéndole a esta población su desarrollo en las cimas de las montañas del Parque Nacional Izta-Popo. De hecho, Torres (2013) encontró un ascenso significativo del límite superior de los árboles de *P. hartwegii* en la cima del Iztaccíhuatl entre 1955 y 2012.

La hipótesis de efecto de adición de área basal propone que conforme la altitud incrementa, la densidad de los individuos disminuye aumentando el área basal (Aiba *et al.* 2007). Es decir que en los bosques que se encuentran en la parte baja o media de las montañas, hay una mayor densidad de individuos con poca área basal; en contraste, en las zonas medias-altas la densidad poblacional es baja pero tienen una mayor ocupación por área. Por un lado, bajo el contexto de regeneración natural, en el piso alto de *A. religiosa* la regeneración es baja: los individuos adultos dominan esta zona lo cual dificulta el establecimiento de plántulas, presentando menor densidad poblacional pero con mayor área basal conforme su altitud de distribución aumenta. Mientras *P. montezumae* y *P. hartwegii* actuaron de manera inversa a la hipótesis como respuesta a las condiciones climáticas estresantes de la zona. La utilización de recursos para tolerar el clima y la competencia produce la complementariedad en la asignación de recursos. Lo anterior resulta en adaptaciones fisiológicas-estructurales en la historia de vida de cada especie, como incrementar moderadamente su altura disminuyendo el diámetro para hacer frente a la limitación de recursos como el calor y el agua con el aumento de la altitud (Wang 2006) (figura 7).

## 8.2. Distribución de la biomasa arbórea y del carbono

La determinación de la biomasa de un bosque permite cuantificar los almacenes de carbono de los ecosistemas (Houghton *et al.* 2009). Las masas boscosas templadas en latitudes medias se establecen a lo largo de un gradiente altitudinal que ejerce una influencia directa e inversa sobre la producción de biomasa y las especies que se establecen en éste (figura 5). La biomasa de los bosques templados en el mundo se distribuye en función de los gradientes altitudinales; por ejemplo, a los 3 000 m en bosques templados de China y México la biomasa determinada varía  $72 \text{ Mg ha}^{-1}$  entre estos países (Garkoti 2008, García 2011). Asimismo, entre los 3 400 m y 3 500 m también en China y México existió una diferencia de  $100 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Luo *et al.* 2002, este estudio) (cuadro 9). El manejo forestal entre latitudes son diferentes siendo más comunes en países con desarrollo económico, sin embargo, la productividad de los sistemas permanece aún sin evidencia clara de un manejo sustentable como lo es el caso de México específicamente en los proyectos propuestos para algunos bosques del país como el Parque Nacional Izta-Popo (Masera *et al.* 1995, Mendoza y Galicia 2010). En gradientes altitudinales entre 1 000 m y 3 800 m en los ecosistemas templados del mundo, los almacenes de biomasa varían y pueden diferir entre sí hasta  $300 \text{ Mg MS ha}^{-1}$  (cuadro9). En China, Luo *et al.* (2002) determinaron a los 2 200 m,  $329 \text{ Mg ha}^{-1}$  y a los 3 500 m  $477 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomasa; en este trabajo, se cuantificó a 3 100m  $416 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $101 \text{ Mg MS ha}^{-1}$  a los 3 600 m dependiendo de la especie (tabla 9). En este mismo estudio, los autores tuvieron una diferencia de  $148 \text{ Mg ha}^{-1}$  en 1 300 m de variación. Mientras que en México; en sólo 500 m los almacenes de biomasa variaron aproximadamente  $315 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Las condiciones climáticas en los gradientes altitudinales junto con la estacionalidad de los sistemas pueden ser más contrastantes en zonas de los países del Norte del planeta modificando la productividad de los ambientes. En contraste, en latitudes medias, la estacionalidad no limita severamente la acumulación de biomasa entre los cambios de estación. Además, el calentamiento global actuará de manera distinta sobre las especies de latitudes medias posiblemente ampliando su intervalo de productividad y de distribución. Las poblaciones de

pinales que se establecen en México son más productivas y su correcto manejo forestal podría generar grandes almacenes de biomasa (Cuevas 2005, Bertin 2008).

El 60% del carbono almacenado en la biomasa de los bosques de coníferas en México provienen de las áreas protegidas ( $86 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , de  $118 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), el promedio de emisiones de éstos es de  $7.2 \text{ Mg C año}^{-1}$  (Masera *et al.* 1995, 1997). En este trabajo se ha calculado que el carbono almacenado en la biomasa de los bosques del Parque Nacional Izta-Popo varió dependiendo de la altitud en promedio alrededor de los  $90 \text{ Mg C ha}^{-1}$  y decayó aproximadamente 50% entre los pisos altitudinales y las especies estudiadas (figura 4). Se observa que cuando un bosque está bajo reserva protegida entonces es posible que el carbono almacenado aumente en  $10 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en el periodo de 1995-2013, con la consideración de que el Parque Nacional Izta-Popo es de las áreas protegidas con mayor extensión de bosques templados con la que cuenta el país, en comparación trabajos de modelación de fijación de carbono para los próximos 250 años en áreas no de reserva o conservación predicen una fijación de carbono en los bosques de coníferas de México de  $2.29$  a  $5.05 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Ordoñez *et al.* 2001, Mendoza y Galicia 2010) La zona más conservada del bosque se encuentra en la cima de las montañas. Sin embargo; la captura de carbono en estas áreas está limitada por la especie forestal que ahí se establece. *P. hartwegii* tiene la menor cantidad de carbono orgánico, incorporando solo  $4 \text{ Mg C año}^{-1}$  (PRONATURA 2009).

El interés por conservar las cubiertas vegetales forestales no es nuevo; desde la promulgación del Protocolo de Kyoto, los sumideros de carbono, se han convertido en un segmento clave en la mitigación de cambio climático (Cuevas 2005). México, tiene el compromiso, de reducir sus emisiones provenientes del cambio de uso de suelo en un 30% para el 2030 (Cuevas 2005). Se ha sugerido que las mediciones de biomasa se lleven a cabo cada cuatro o cinco años para identificar las alteraciones en los almacenes por disturbios, variaciones del clima y fenología del sistema, las cuales perturbarían de manera directa las reservas terrestres de carbono (Houghton *et al.* 2009). Por otra parte, la reforestación y la promoción de la

regeneración de las zonas medias y baja con especies de rápido crecimiento y elevadas tasas de establecimiento, permitirán el manejo forestal necesario, para la captura de carbono (Mendoza y Galicia 2010). Esto permitirá perpetuar los servicios vitales que los bosques nos brindan; como el intercambio de CO<sub>2</sub> y oxígeno que se genera en estos ecosistemas y el abastecimiento de las cuencas cercanas. La disminución de la cubierta vegetal de los bosques, hace que resulte cada vez más difícil asegurar y garantizar los servicios ambientales que se generan en estas zonas, los planes de manejo deben ser más ambiciosos a mediano y corto plazo; además, de la asignación de recursos financieros para la mitigación del cambio climático.

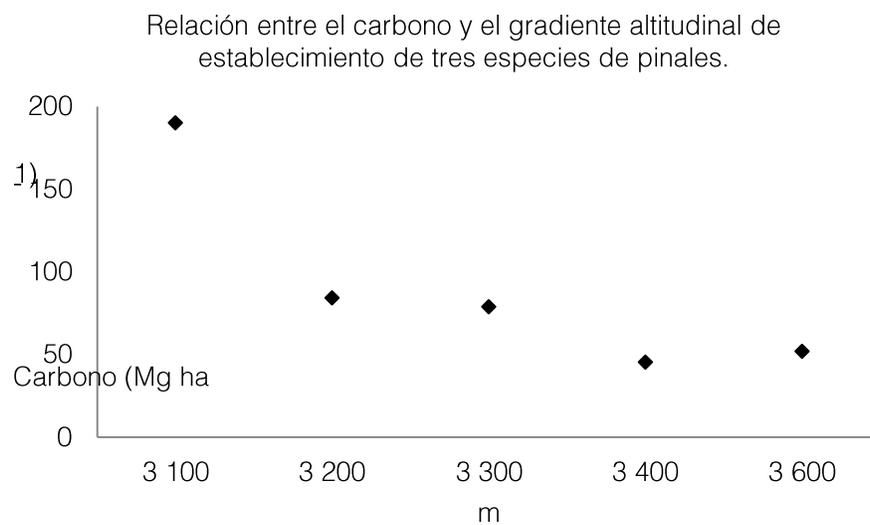


Figura 5. Carbono almacenado en los diferentes pisos altitudinales de muestreo de *Pinus montezumae* (3 100 y 3 200 m), *Abies religiosa* (3 300 y 3 400 m) y *Pinus hartwegii* (3 300 y 3 400 m) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

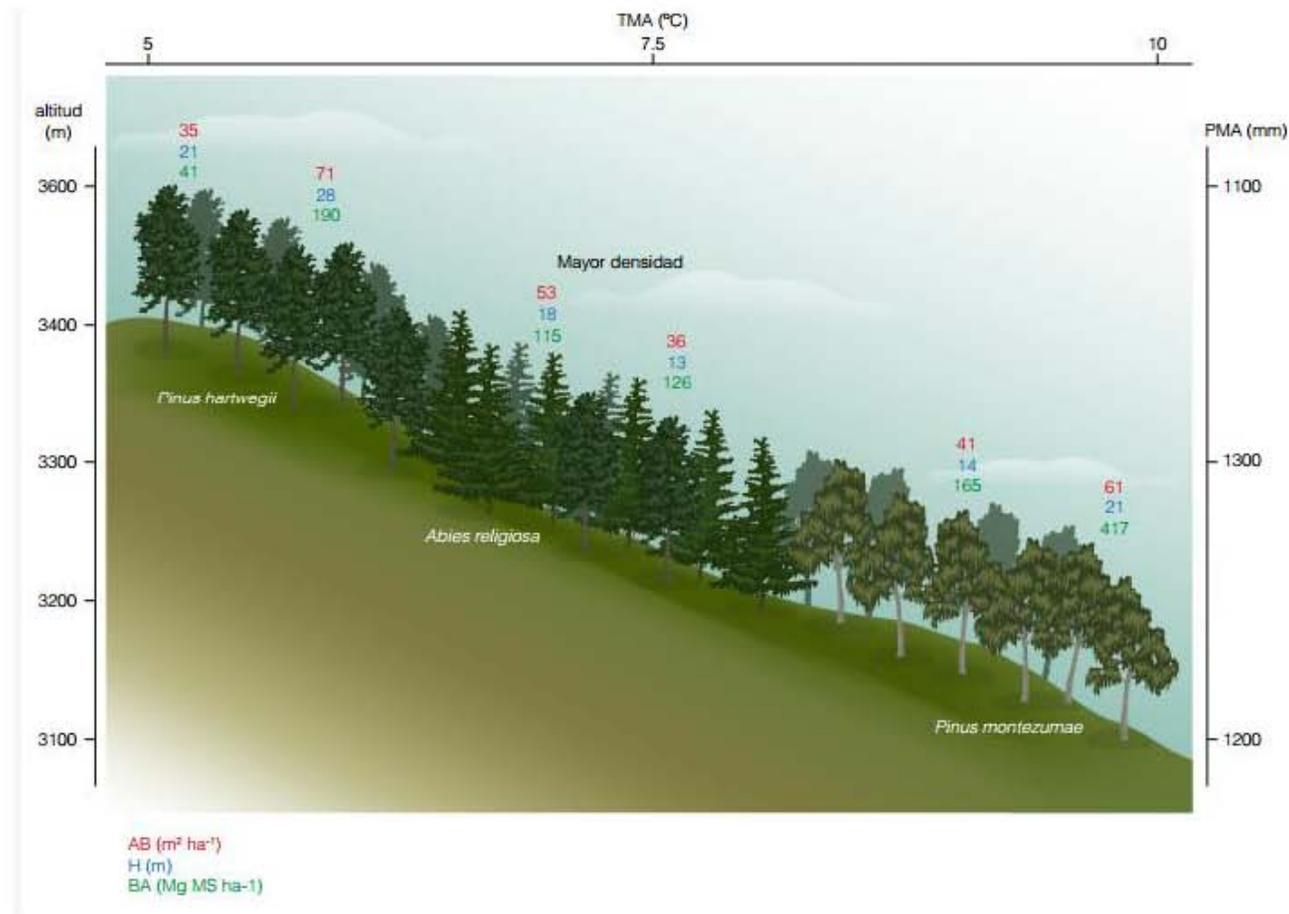


Figura 8. Esquema de resultados obtenidos en este trabajo de las características dasométricas de tres especies de pinos en el Parque Nacional Ixta Popo Zoquiapan de acuerdo a la altitud de muestreo y el gradiente de clima descrito por Laurer (1978). Área basal (AB); altura (H); biomasa arbórea (BA); no regeneración observada (NR); regeneración observada (R).

Cuadro 8. Biomasa arbórea de bosques templados en diferentes partes del mundo.

Altitud (m)	Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> )	País	Autor
680 – 720	195.8	Japón	Tateno <i>et al.</i> (2004)
1 000 - 1 200	134.46	China	Fang <i>et al.</i> (1998)
1 000 - 1 200	194	Portugal	Correia <i>et al.</i> (2010)
2 200	329.92	China	Luo <i>et al.</i> (2002)
3 000	304.3	China	Garkoti (2008)
3 000	376	México	García (2011)
3 100	416.54	México	Este estudio
3 100	211.29	China	Luo <i>et al.</i> (2002)
3 200	165.00	México	Este estudio
3 300	115.32	México	Este estudio
3 400	370.00	México	Este estudio
3 500	477.98	China	Luo <i>et al.</i> (2002)
3 600	101.09	México	Este estudio
3 860	296.00	México	Mendoza-Ponce y Galicia (2010)

Recopilación de datos de la biomasa arbórea en distintos países a diferentes altitudes.

### 8.3. Determinación de la biomasa arbórea por medio de ecuaciones alométricas usando factores de corrección

La fidelidad sobre la pérdida y secuestro de carbono asociada con el cambio de uso de suelo, genera una implicación directa en la introducción de los créditos de carbono a través de programas que evitan la deforestación y la degradación de los bosques. La determinación de la biomasa; generalmente se hace por medio de la relación entre la masa de algún componente arbóreo y una variable de crecimiento. Estos modelos alométricos se han usado desde hace varias décadas; sin embargo, hasta este siglo se han remarcado las dificultades estadísticas que presentan estas estimaciones. Varios autores han planteado que se puede sobreestimar y subestimar la biomasa arbórea viva como consecuencia de la selección de los modelos alométricos y de la manipulación de los datos (Chave *et al.* 2001). En los bosques tropicales los modelos alométricos generalizados permiten un acercamiento a la cuantificación de la biomasa. La biodiversidad por metro cuadrado que tienen estos ecosistemas vuelve complejo la generación de una ecuación alométrica por especie. En contraste; en los bosques templados la baja heterogeneidad arbórea facilita la obtención de modelos alométricos específicos para cada árbol. Las ecuaciones especie-específicas son hechas por métodos destructivos creadas a partir de una muestra poblacional, donde la densidad y el diámetro normal fueron las variables que ajustaron el modelo. Estas ecuaciones son más factibles de realizar en zonas templadas donde la diversidad vegetal arbórea es más baja en comparación con las selvas tropicales o secas, por ejemplo los bosques de los estados de Tlaxcala e Hidalgo, así como el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan donde fueron creadas las ecuaciones utilizadas en este estudio generan una menor incertidumbre; asegurando un efecto incluyente en la biomasa determinada y se disminuyen los errores relativos a la manipulación, ya que este último es sensible al factor especie (Wang 2006).

Respecto a los factores de corrección como QMLE y RE han sido utilizados para eliminar el sesgo en las determinaciones de biomasa en selvas secas. Sin embargo; la diversidad de formas vegetales reduce la posibilidad de que los factores de corrección fueran más eficientes

que los modelos no lineales (Búrquez y Martínez-Yrizar 2011). Asimismo en los bosques templados del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan la variabilidad de los residuales de la biomasa si se pudo explicar por medio del factor QMLE en el piso alto de *A. religiosa* y de *P. hartwegii*; aunque los modelos no lineales determinaron de una manera más satisfactoria la cantidad de biomasa en la especie *P. montezumae montezumae* y los pisos bajos de las otras especies del parque.

Los casos extraordinarios en los tamaños de los diámetros de las poblaciones arbóreas se eliminan de los modelos alométricos cuando se genera el intervalo de aplicación de las ecuaciones alométricas. Este intervalo representa la heterogeneidad común de la estructura y rige el tamaño de los individuos que se incorporan al modelo evitando sesgos en las mediciones. A pesar de que grandes cantidades de biomasa queden con ello excluidas. Como se observó en la especie *A. religiosa* la biomasa eliminada no fue significativa ya que las ecuaciones alométricas comprenden las clases diamétricas más frecuentes de la especie para las que fueron modeladas (Wang 2006). Si se hiciera un muestreo dirigido como el que realizaron Zianis y Mencuccini (2004); en donde todos los individuos medidos en campo deben tener menos de 3 cm de diferencia entre ellos y ser menores a 30 cm de diámetro normal; alteraría la distribución estadística de la biomasa de la especie. A pesar de que todos los individuos estén integrados en las mediciones alométricas el propósito ecológico de las ecuaciones se perdería representando una población estable y poco cambiante. Esto al convertir la heterogeneidad y productividad del ecosistema en una cantidad de materia de una plantación forestal; limitando los planes de manejo para el aprovechamiento y aplicación de planes de captura de carbono. En comparación con el método anterior de muestreo, naturalmente sí se pueden encontrar estructuras poblacionales homogéneas un ejemplo de esto, es la población de la especie *P. montezumae* en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, en la cual solo se descartó el 2% de la biomasa total debido al equilibrio estructural dentro de sus clases diamétricas.

## 9. Conclusiones

Las masas forestales tienen una dinámica poblacional de reclutamiento más activo en la especie *A. religiosa* donde la densidad de las clases diamétricas <10 a 30-50 cm es mayor. En los extremos del gradiente altitudinal muestreados se observó que la clase diamétrica <10 cm en *P. montezumae* es poca y nula para *P. hartwegii*. Por otro lado, en dos especies la biomasa guarda una relación inversa con la altitud. La disminución de los recursos como la temperatura y la humedad hacia la cima de los ecosistemas de montaña puede generar un crecimiento menor y por lo tanto menor biomasa. En este estudio se determinó la mayor biomasa para la especie *P. montezumae* seguida de *A. religiosa* y por último la especie *P. hartwegii*. Además la evaluación de la biomasa por medio de ecuaciones alométricas sin la adición de un factor de corrección fueron las más certeras, solo en algunos casos el factor QMLE determinó más fielmente la cantidad de biomasa, legitimando que los almacenes de carbono orgánico de las zonas medias y bajas del Parque Nacional Izta-Popo son factibles para implementar acciones de manejo forestal para la captación de CO<sub>2</sub>.

## Referencias

- Aiba S, Hanya G, Tsujino R, Takyu M, Seino T, Kimura K, Kitayama K (2007) Comparative study of additive basal area of conifers in forest ecosystems along elevational gradients. *Ecological Research* 22:439-450.
- Avendaño H, Acosta M, Carrillo A y Etchevers B (2009) Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(3):233-238.
- Barbeito I, Dawes M, Rixen C, Senn J y Bebi P (2012) Factors driving mortality and growth at treeline: a 30-year experiment of 92 000 conifers. *Ecology* 93(2):389-401.
- Beniston M (2003) Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change* 59:5-31.
- Bertin R (2008) Plant Phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society* 135(1):126-146
- Bonilla P (2009) Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de licenciatura, Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, 70 págs.
- Búrquez A y Martínez-Yrizar A (2011) Accuracy and bias on the estimation of aboveground biomass in the woody vegetation of the Sonoran Desert. *Botany* 89:625-633.
- Chave J, Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Lao S y Perez R (2004) Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359:409-420.
- Chave J, Riéra B y Dubois M (2001) Estimation of biomass in a neotropical Forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology* 17:79-96.
- CONANP (2011) Biodiversidad del Parque Nacional. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Fecha de consulta agosto 2011.
- Coníferas de México (2011) *Abies religiosa* <http://chestofbooks.com/reference/American-Cyclopaedia-V7/index.html>, Fecha de consulta agosto 2011

- Coomes D y Allen R (2007) Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95:1084-1097.
- Correia A, Tomé M, Pacheco C, Faias S, Dias A, Freire J, Carvalho P y Pereira J (2010) Biomass allometry and carbon factor for a Mediterranean pine (*Pinus pinea* L.) in Portugal. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria* 19(3):418-433.
- Cuevas A (2005) El papel de los bosques en el Protocolo de Kyoto: el caso del manejo forestal de Nueva Zelanda y México. *México y la Cuenca del Pacífico* 8(24):62-73.
- Dukes J y Mooney H (1999) Does Global Change Increase the Success of Biological Invaders? *Trends in Ecology and Evolution* 14:135–139.
- Espinosa P (2005) Estimación de carbono y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, D.F. Tesis de licenciatura en biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, págs. 93.
- Fang J, Wang G, Liu G y Xu S (1998) Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications* 8(4):1084-1091.
- Farjon, A. y Styles, B. (1997). *Flora Neotropica Monograph 75, Pinus* (Pinaceae). EUA The New York Botanical Garden. Bronx, New York. 239. págs.
- Ficha técnica CONAFOR (2011) *Pinus montezumae* <http://www.conafor.gob.mx>. Fecha de consulta agosto 2011
- Ficha técnica CONAFOR (2011) *Abies religiosa* <http://www.conafor.gob.mx>. Fecha de consulta agosto 2011
- García G (2000) Comportamiento de la dinámica sucesional de *Abies religiosa* (HDK) SCHL. *et. CHAM.*, Y *Pinus hartwegii* LINDL., en la estación forestal experimental Zoquiapan, Estado de México. Tesis licenciatura, Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, págs. 38 págs.
- García I (2011) Estimación del contenido y captura potencial de carbono del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. *Et Cham* en el Parque Nacional Nevado de

- Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura en biología, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 73 págs.
- Garkoti S (2008) Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. *Ecological Research* 23:41-49.
- Goche-Télles J, Fuentes-Salinas M, Borja-de la Rosa A y Ramírez-Maldonado H (2000) Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(1): 83-92.
- Heil G, Bobbink R, Boix N (2003) *Ecology and Man in Mexico's Central Volcanoes Area*. Londres. Kluwer Academic Publishers. 222 págs.
- Houghton R, Hall F y Goetz S (2009) Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research* 114:G00E03, doi:10.1029/2009JG000935.
- IPCC (2011) *Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Tercer Reporte de Evaluación. Contribución de los Grupos de Trabajo al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012
- IPCC (2011) *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y A. Reisinger (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012
- Jiménez C (2010) *Uso de las ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de Pinus hartwegii Lindl., en el Parque Nacional Izta-Popo*. Tesis de licenciatura, Ingeniero en Restauración Forestal. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, 65 págs.

- Körner C (1998) A re-assessment of high elevation tree line positions and their explanation. *Oecologia* 115:445-459.
- Lauer W (1978) Timberline studies in Central Mexico. *Arctic and Alpine Research* 10(2):383-396.
- Liang E, Wang Y, Xu Y, Liu B y Shao X (2010) Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Trees* 24:6363-373.
- Luckman B y Kavanagh T (2000) Impact of climate fluctuations on mountains environments in the Canadian Rockies. *Ambio*: 29:371-380.
- Luo T, Li W y Zhu H (2002) Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications* 12(4):980-997.
- Masera O, Ordóñez A. y Dirzo R (1997) Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climate Change* 24:256-295.
- Masera O, Bellon M y Segura G(1995) Forest management options for sequestering carbon in Mexico. *Biomass and Bioenergy* 8(5):357-367.
- Mendoza-Ponce A y Galicia L (2010) Aboveground and belowground biomass and carbon pools in Highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83(5):497-506.
- Meshinev T, Apostolova I y Koleva E (2000) Influence of warming on timberline rising: a case study on *Pinus Peuce Griseb* in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30:431-438
- Nogués-Bravo D, Araújo M, Errea M y Martínez-Rica J (2007) Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17:420-428.
- Ordoñez 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.
- Parra-Tabla V, Abdala-Roberts L, Rojas J, Navarro J y Salinas-Peba L (2009) Floral longevity and scent chemistry respond to reproductive success and resource status in the tropical orchid *Myrmecophila christinae*. *Plant Systematic Evolution* 282:1-11.

- PRONATURA (2009) Restauración de Servicios Ambientales en el Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan, [http://qacontent.edomex.gob.mx/congresopsa/documentos/ponencias/groups/public/documents/edomex\\_archivo/congresopsa\\_pdf\\_reforestacion.pdf](http://qacontent.edomex.gob.mx/congresopsa/documentos/ponencias/groups/public/documents/edomex_archivo/congresopsa_pdf_reforestacion.pdf). Fecha de consulta 2013.
- Rzedowski J (2006) Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, págs. 504.
- Sánchez-González A y López Mata L (2003) Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Serie Botánica* 74(1):41-71.
- SEMARNAT (2009). Plan Nacional de Desarrollo, Programa Especial de Cambio Climático. [http://www.semarnat.gob.mx/programas/Documents/PECC\\_DOF.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/programas/Documents/PECC_DOF.pdf)\_Fecha de consulta 2013.
- Smith R (1993) Logarithmic Transformation Bias in Allometry. *American Journal of Physical Anthropology* 90:215-228.
- Stevens G y Fox J (1991) The causes of treeline. *Annual Review of Ecology and Systematics* 22:177-191.
- Tateno R, Hishi T y Takeda H (2004) Above- and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *Forest Ecology and Management* 193:297-306.
- UN (1998) Proclamation of the International Year of the Mountains. Report on the 1998 UN General Assembly Meeting, New York.
- Villers-Ruiz L y Trejo-Vázquez I (1998) Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23:1.
- Wang Ch (2006) Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forest. *Forest Ecology and Management* 222:9-16.

- Zamora-Campos E, Vázquez-Cuecuecha O, Pérez-Ahuatzi A, Cano-Flores R, Aparicio-Rentería A y Fernández-Pedraza E (2007) Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. en tres altitudes del parque nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Forestal Veracruzana* 9(2):33-37.
- Zianis D y Mencuccini M (2004) On simplifying allometric analices of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187:311-332.

## Capítulo dos

Influencia de la temperatura y precipitación sobre el crecimiento arbóreo de dos especies  
de pinales en un gradiente altitudinal

## 10. Introducción

En los ecosistemas templados de montaña disminuye la temperatura y la precipitación conforme la elevación aumenta, determinando un régimen de éstos factores en cada piso elevacional, lo cual produce variaciones en las tasas metabólicas de las especies, el crecimiento, la estatura y la acumulación de biomasa. Por ejemplo, las bajas temperaturas en verano limitan el crecimiento de los anillos a elevadas altitudes, mientras que la limitante de crecimiento a bajas altitudes son las altas temperaturas de primavera. Splachtna et al. (2000) encontraron en un gradiente altitudinal de 1 500 – 2 300 msnm que los anillos y la densidad de la especie *Abies lasiocarpa* decrecían con la altura; además, señalan que a través de este gradiente los agentes que afectan el incremento del diámetro del anillo cambian. Por ejemplo, las bajas temperaturas en verano limitan el crecimiento de los anillos a elevadas altitudes, mientras que la limitante de crecimiento a bajas altitudes son las altas temperaturas de primavera. Por otra parte, en China la vegetación que está más cercana al límite vegetacional (aproximadamente 2 000 msnm), muestra una respuesta positiva al incremento de temperatura en verano, y un decremento en el crecimiento en la estación de lluvias; sin embargo, los individuos que están en la parte baja de la montaña (500 msnm) tienen una correlación negativa en su crecimiento bajo las mismas condiciones ambientales (Lu-San et al. 2006). El decrecimiento de la biomasa y la estatura de los bosques con la altitud ha sido ampliamente documentado en las tierras bajas de los trópicos, sin embargo este tipo de información es escasa en los bosques templados de altura.

Por otro lado, los cambios proyectados para el clima como los aumentos de temperatura, pueden generar una reducción en los recursos hídricos en los ecosistemas de montaña, afectando las tasas de crecimiento (IPCC 2007). Frente a condiciones de cambio climático algunas especies de coníferas de latitudes superiores, como *Abies alba* la cual tiene su mayor distribución en España (hasta los 2 000 m) y *Pinus sylvestris* especie localizada en el hemisferio norte (hasta los 2 400 m), pueden beneficiarse por un calentamiento invernal, pero sufrir de un mayor estrés hídrico en verano. Además, es probable que la fertilidad por CO<sub>2</sub> atmosférico

presente una relación positiva con los demás factores ambientales (Lebourgeois *et al.* 2010). Ricker *et al.* (2007) mencionan que ante los nuevos escenarios de variación climática pronosticados por el IPCC (2007) el ancho de los anillos en los ecosistemas de montaña de México podrían incrementar, siempre y cuando la temperatura y la precipitación aumenten de igual manera.

Los estudios dendrocronológicos en México han aumentado recientemente, debido al interés de obtener reconstrucciones climáticas para identificar las variaciones del clima a lo largo del tiempo como pruebas proxy que permiten predecir el efecto del calentamiento climático global. El reconocimiento de la vulnerabilidad de las especies de alta montaña del centro del país ante un incremento de la temperatura es incuestionable, sin embargo, la mayoría de las cronologías y estudios dendroecológicos realizados en México se enfocan a la zona norte (Villanueva *et al.* 2000). Los pronósticos del IPCC de los años 2001 y 2007 sobre los posibles escenarios climáticos mundiales predicen que los ecosistemas de montaña son de los más susceptibles como resultado de los cambios en la estructura, composición y procesos funcionales de la elevación, asimismo menciona que las zonas de altitudes bajas tenderán a ser más cálidas que las zonas de altitudes elevadas en latitudes similares recorriendo el límite superior vegetacional unos metros en los próximos años (Bickford *et al.* 2011). Los cambios de elevación se han tomado como fuentes de experimentación natural de los diferentes ecosistemas para pronosticar las posibles respuestas de la vegetación a los cambios en el clima. El Parque Nacional Izta-Popo provee de una extensión vertical aproximada a los 4 000 msnm en donde son visibles los pronósticos de reducción de la precipitación y el aumento de temperatura (Körner 2007). Por lo que el objetivo general de este estudio es evaluar el crecimiento arbóreo y la influencia del clima de los últimos 50 años sobre el ancho de los anillos en dos especies de bosque templado en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Los objetivos particulares son: (a) caracterizar el crecimiento y la acumulación de carbono a través de los anillos de crecimiento en

dos especies de pinales (pino y oyamel), y (b) entender la relación entre la precipitación y la temperatura con el crecimiento de dos especies de pinales en un gradiente altitudinal.

## **11. Métodos**

### **11.1. Sitio de estudio**

Ver capítulo uno página 27

### **11.2. Características de las especies seleccionadas**

Se seleccionaron las especies *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* por ser de amplia distribución dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, forman masas boscosas mono-específicas entre los 3 000 y 4 200 m (cuadro 1); además estas especies de coníferas forman anillos anuales y son fuente de datos dendrocronológicos fieles debido a las zonas de montaña donde se establecen. *Abies religiosa* es una especie que tiene anillos más anchos y su tasa de crecimiento es mayor en comparación con la especie *Pinus hartwegii*; sin embargo este último muestra cronologías más largas a las del oyamel (Martínez 2011). Ver capítulo 1 página 28.

### **11.3. Diseño de muestreo**

#### **11.3.1. Crecimiento de dos especies arbóreas de bosques templados**

Se muestrearon dos pisos de elevación para *Abies religiosa* (3 100 y 3 300 m) y tres pisos de *Pinus hartwegii* (3 400, 3 600 y 4 000 m). Para cada piso de elevación de cada especie, se seleccionaron 40 individuos al azar dentro de las masas boscosas mono-específicas de cada uno, cada árbol muestreado estaba separado uno de otro aproximadamente 5 m. Se tomaron dos muestras dendrocronológicas (virutas) de cada individuo, para un total de 200 individuos y 400 muestras (cuadro 1). La selección de los individuos se llevó a cabo bajo los siguientes criterios: árboles con un diámetro >30 cm a la altura del pecho (DN) para poder obtener la mayor cronología posible, sanos y sin presencia de disturbios aparentes.

Cada viruta se obtuvo por medio de un taladro Pressler (44 mm/16”), una opuesta a otra a una altura de 1.30m aproximadamente. Las muestras se colocaron en popotes para su conservación y se etiquetaron con el nombre de la especie y el piso altitudinal al que pertenecían. En laboratorio se secaron a temperatura ambiente; una vez secas, se pegaron en monturas para su posterior lijado en el Taller de mecánica del Instituto de Ciencias de la Atmósfera. Las lijas que se utilizaron fueron de granos 80, 100, 120 para la lija de banda y 400, 600 y 1 000 para la lija de disco. Posteriormente las muestras se escanearon en una resolución de 1200dpis y se analizaron con el programa Wind-Dendro®, con el cual se obtuvo el ancho total del anillo, así como la longitud de la madera temprana y tardía; se descartaron anillos falsos y se realizó un fechado cruzado para la serie cronológica.

La edad de las poblaciones de cada piso altitudinal se estimó por el número total de anillos, el incremento corriente anual se obtuvo a partir del ancho del anillo acumulado además las poblaciones se dividieron en juvenil (hasta los 30 años de edad), madura (30 – 60 años) y senectud (más de 90 años), como lo marca la división convencional en el manejo forestal por edad. Por otro lado, con base en el centro de las virutas obtenidas de las muestras dendrocronológicas se determinó el diámetro del árbol por año, a partir del intervalo de diámetro normal válido para las ecuaciones alométricas específicas para cada especie (*A. religiosa* y *P. hartwegii*) se cuantificó la biomasa incorporada por anillo de crecimiento, esta biomasa se multiplicó por 0.5 para obtener el carbono neto anual fijado por el árbol para cada año de vida. Para hacer las comparaciones entre las series carbono obtenidas a través del tiempo de las dos especies, solo se compararon los intervalos donde las series convergieran, es decir hasta la edad de las series más pequeñas de las dos especies respecto a sus pisos altitudinales. Con los datos anteriores se determinaron las curvas de crecimiento, la cantidad de madera temprana y tardía y la cantidad de carbono acumulado a través del tiempo en las dos especies de pinales para sus dos pisos altitudinales.

Cuadro 1. Altitudes de muestreo de dos especies arbóreas seleccionadas en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan

	Altitud (m)	Individuos	Virutas	
<i>Abies religiosa</i>	3 100	40	80	Ar (-)
	3 300	40	80	Ar (+)
<i>Pinus hartwegii</i>	3 400	40	80	Ph (-)
	3 600	40	80	Ph (+)
	4 000	40	80	Ph (++)
	Total	200	400	

Dos pisos de muestreo para la especie *Abies religiosa* Ar (-), piso alto de la misma especie Ar (+), piso bajo de muestreo y tres pisos para *Pinus hartwegii* piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++)

### 11.3.2. Influencia del clima en el crecimiento arbóreo

Todas las muestras recolectadas se estandarizaron por medio del programa ARSTAN (Stokes y Smiley 1996). El cual remueve la tendencia de crecimiento asociada al incremento en tamaño y edad del árbol. El proceso de eliminación de tendencias ajusta cada curva de crecimiento con algún tipo de función (cuadrática, polinomial, logarítmica o spline) la cual depende de la estructura original de la serie de mediciones. Los índices de crecimiento son calculados para cada año mediante el cociente entre el valor medido y el valor de la serie de ajuste del mismo año con una media de 1.0 a lo largo de toda la serie formada (Roig *et al.* 2001).

Se obtuvo el promedio de la temperatura máxima, mínima y la precipitación por mes para el total de los años, así mismo se determinaron los meses y años más fríos, cálidos, lluviosos y secos de las series climáticas de seis estaciones climatológicas cercanas al área de estudio (cuadro 2). Con los datos anteriores cada factor climático (tmax, tmin y pp) por mes y año se correlacionaron y relacionaron linealmente con los índices de anillo y madera temprana y tardía de *A. religiosa* y *P. hartwegii* para cada uno de sus pisos altitudinales.

### 11.3.3. Análisis de datos

Cada una de las variables de respuesta (ancho del anillo; índice de anillo, carbono y la madera temprana y tardía) se normalizaron para cumplir con los requerimientos de homogeneidad de varianzas y heterogeneidad satisfactorias, algunas variables como el ancho de los anillos para generar el índice de anillos se realizaron con el programa ARSTAN antes descrito. Se realizaron análisis de varianza para probar los efectos de sitio y clima sobre el ancho de los anillos, crecimiento y carbono en las especies de pinales.

Además se realizaron análisis de correlación y regresión lineal entre el clima ( $t_{max}$ ,  $t_{min}$  y  $pp$ ) y el ancho del anillo de crecimiento y los tipos de madera de las especies arbóreas, para determinar cual factor climático ejerce una influencia mayor sobre la acumulación de biomasa y carbono. Lo anterior se realizó con los programas Statistica 8® e Intercooled Stata 9.1®.

Cuadro 2. Período de datos utilizados de las series climáticas por cada estación metereológica cercana al área de estudio pertenecientes al Estado de México.

Estación climática	Altitud de establecimiento (m)	Años
San Rafael	2 600	1961-2009
San Pedro Nexapa	2 620	1961-2007
Río Frío	3 000	1961-1987
Ávila Camacho	2 900	1971-2008
Amecameca	2 480	1968-2008
Atlautla	2 350	1982-2008
Islas (2011)		

## 12. Resultados

### 12.1. Crecimiento y almacenes de carbono en dos especies arbóreas de bosques templados

#### 12.1.1. *Abies religiosa* (HBK) Schl. Et Cham

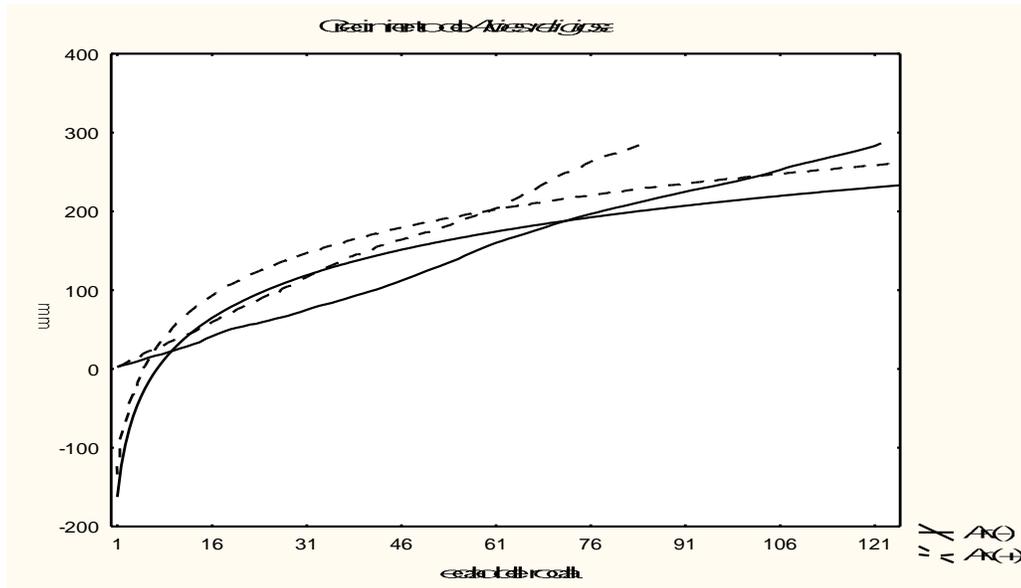
La cronología más larga se ubicó en el piso bajo con 123 años (1890 – 2012), mientras que el piso alto tuvo 85 años (1928 – 2012). Las curvas de crecimiento y ancho de anillos se dividieron en juvenil (0-30 años), adulto (30-70) y senescencia (más de 70 años), dependiendo de la forma logarítmica o estacionaria de la curva de crecimiento. En las tres etapas de vida el rodal del piso alto tuvo mayor crecimiento que el del piso bajo. En la etapa juvenil, el piso alto fue 20% mayor (18.71 mm), en la etapa madura un 17% (49.1 mm) y en la senectud 15% (60.1 mm) en su crecimiento en relación al piso bajo ( $F(1,205) = 136.28, p < 0.01$ ) (figura 1a).

Los anillos de crecimiento fueron más anchos con el incremento de la altitud. *Abies religiosa* en el piso alto (3 300 m) tuvo más anchos los anillos de crecimiento que el piso bajo (3 100 m) (3.4 y 2.3 mm, respectivamente) ( $F(1, 206) = 47.98, p < 0.01$ ). En contraste, el ancho de los anillos de crecimiento disminuyó en relación a la edad; sin embargo para los últimos 30 años, se registraron incrementos de 4 mm para el piso alto y de 7 mm para el piso bajo (figura 1b). El ancho de la madera temprana y tardía fue mayor en el piso alto, asimismo, la madera temprana tuvo mayor crecimiento que la madera tardía. En el piso alto, el ancho de la madera temprana fue de 20% (0.86 mm) mayor que el piso bajo ( $F(1,206) = 97.70, p < 0.01$ ); también la madera tardía fue 13% (0.2 mm) ( $F(1,206) = 73.60, p < 0.01$ ) más ancha en el piso alto (figura 2 a y b).

Los cambios temporales en el ancho del anillo de *Abies religiosa* presentaron una curva de ajuste exponencial negativa respecto al tiempo en los dos pisos altitudinales. Entre 1940 y 1950, el ancho de los anillos se incrementó un 20%, registrando los niveles máximos de crecimiento (3.2 y 3.9 mm para el piso bajo y alto, respectivamente). Para 1970-1980, el ancho del anillo disminuyó 40% (1.4 y 1.3 mm para el piso bajo y alto); sin embargo a partir de 1990, el piso bajo y alto repuntaron en su crecimiento aumentando 49% el ancho de su anillo (1 y 2 mm en los pisos bajo y alto, respectivamente) ( $F(1,205) = 136.28, p < 0.01$ ) (figuras 3 y 4).

El carbono fijado cambió en relación a la altitud y a la edad entre los 13 y 80 años de las poblaciones de *A. religiosa*. El piso alto tuvo 3% más carbono en los primeros 30 años de vida en relación al piso bajo (10%, 2.50 Mg C alto y 7%, 0.89 Mg C bajo). Los individuos más longevos en el piso bajo concentró 6.72 Mg C (56%) y el piso alto 13.79 Mg C (56%); en total, el piso alto acumuló por individuo hasta los 80 años 24.30 Mg C mientras que los árboles del piso bajo acumularon 13.40 Mg C. El crecimiento de las poblaciones aún no se estabiliza por lo tanto la fijación de carbono sigue con una tendencia positiva (figura 5).

(a)



(b)

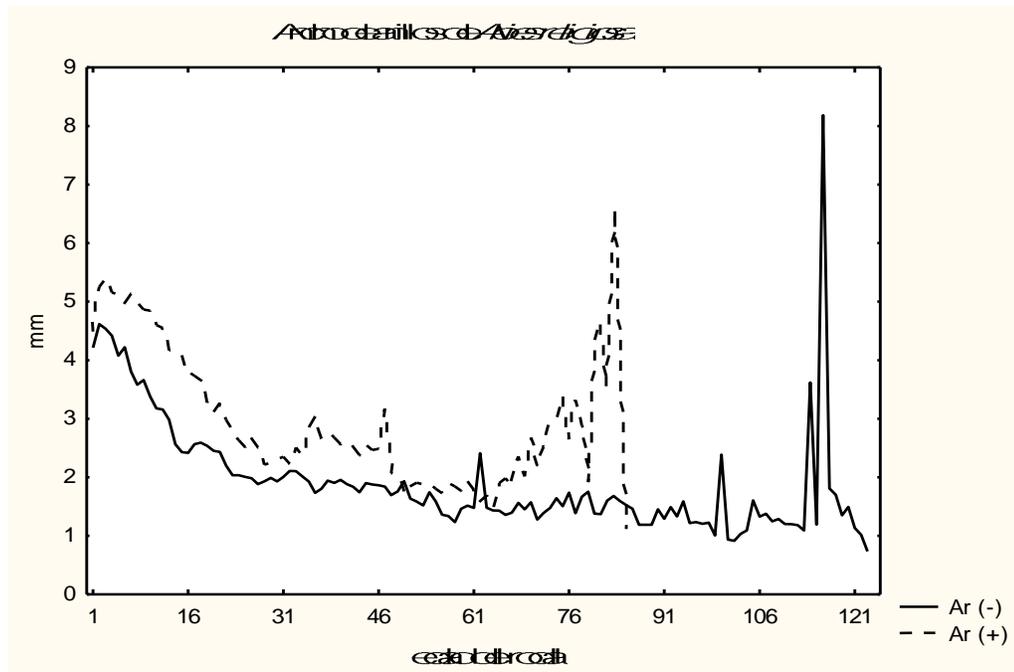
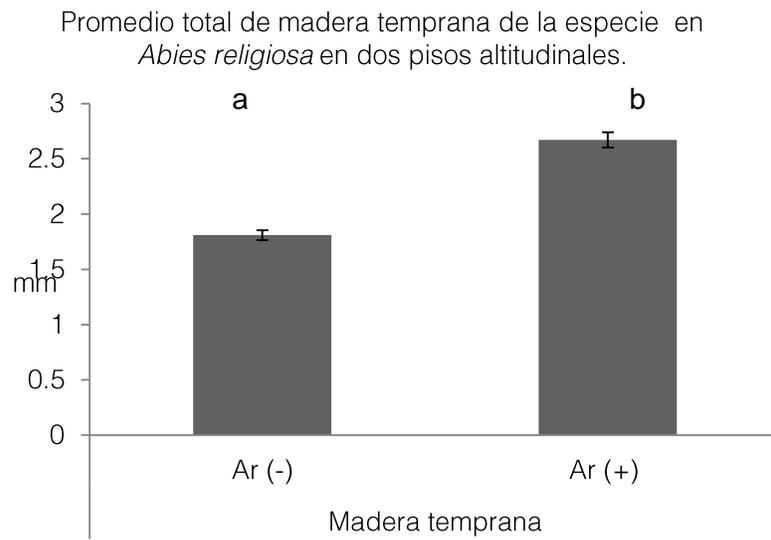


Figura 1. a) crecimiento (mm) y (b) variación en el ancho del anillo de *Abies religiosa* en dos pisos altitudinales del Parque Nacional Izta – Popo Zoquiapan. (Piso bajo (Ar-) y piso alto (Ar+)).

(a)



(b)

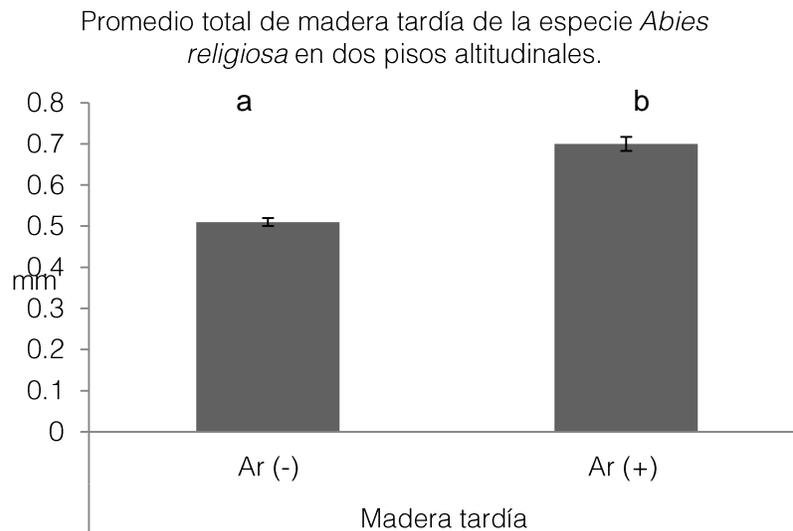


Figura 2. Promedio del ancho de (a) madera temprana (mm) y (b) madera tardía (mm) en dos pisos altitudinales de *A. religiosa* en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ar (-) y piso alto Ar (+).

Ancho de anillo de la especie *Abies religiosa* en dos pisos altitudinales

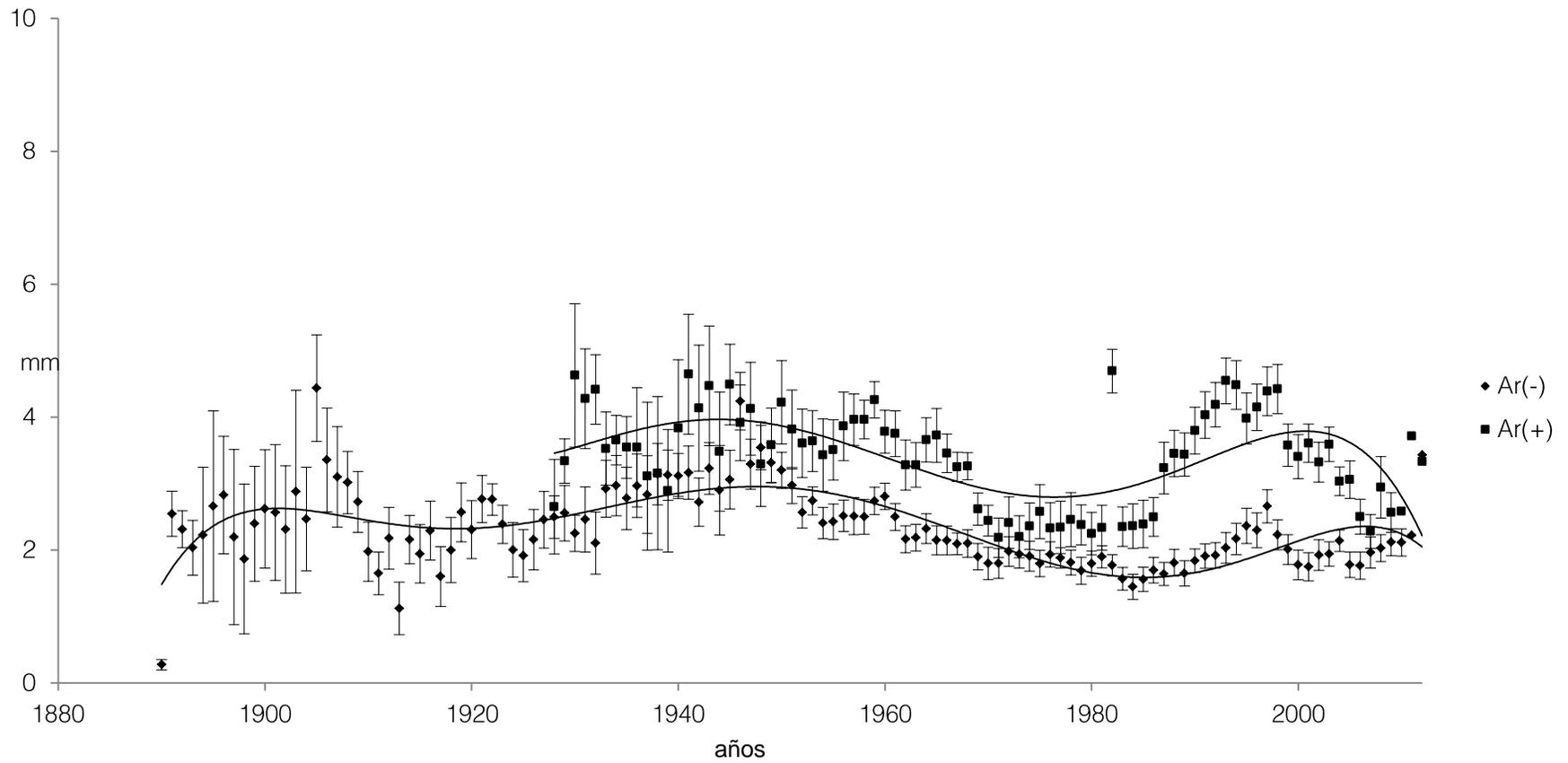


Figura 3. Tendencia temporal en el ancho del anillo de crecimiento (mm) de la especie *Abies religiosa* en dos pisos altitudinales (piso bajo rombo sólido (3 100 m) (Ar-) y piso alto cuadro sólido (3 300 m) (Ar+)) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

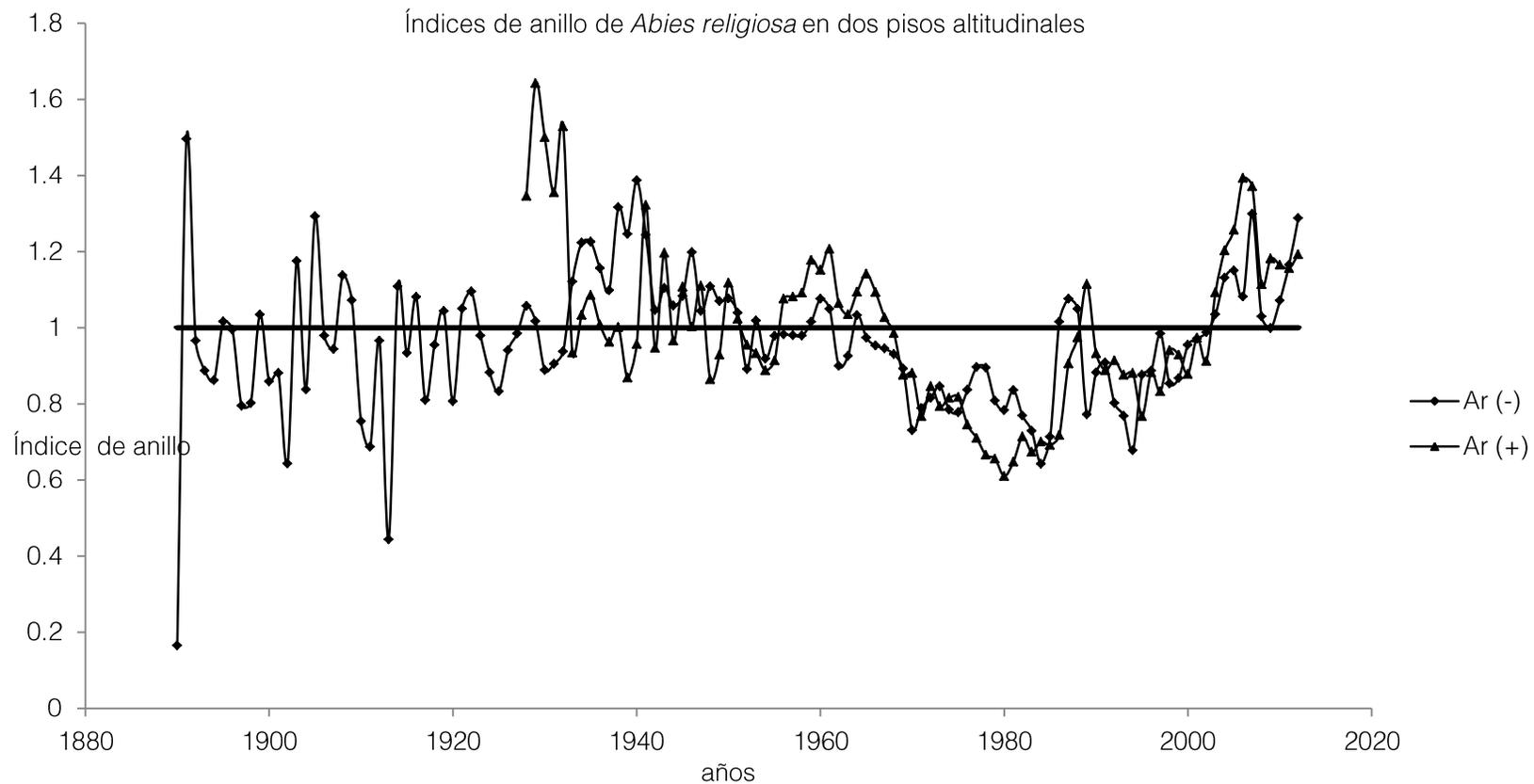


Figura 4. Estandarización de los anillos de crecimiento de la especie *Abies religiosa* en dos pisos de muestreo (piso bajo rombo sólido (3 100 m) (Ar-) y piso alto triángulo sólido (3 300 m) (Ar+)) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

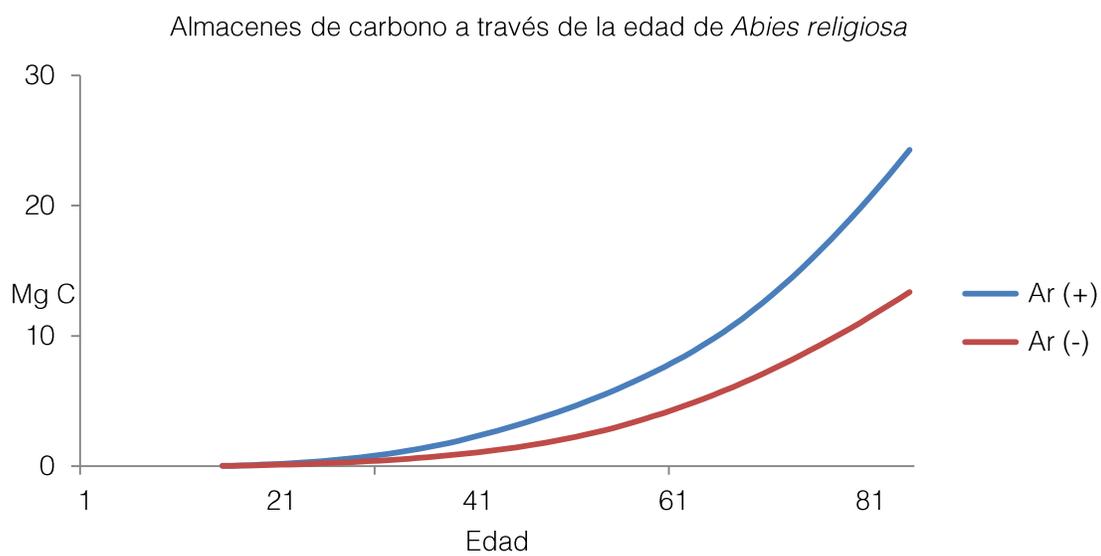


Figura 5. Carbono acumulado en las diferentes edades de *Abies religiosa* en dos pisos de muestreo de en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ar (-) 3100 m, piso alto Ar (+) 3 300 m.

### 12.1.2. *Pinus hartwegii* Lindl.

Los tres pisos altitudinales de esta especie muestreados sobrepasaron el siglo de edad, es decir, son maduras con un crecimiento constante y mínimo en los últimos años. El piso elevado (4 000 m) registró la población de mayor edad con 156 años (1856 – 2012), seguido del piso bajo (3 400 m) con 116 años (1896 – 2012) y el piso medio (3 600 m) que es el más joven con 102 años (1910 - 2012). Los pisos altitudinales tuvieron un crecimiento inverso en relación a su elevación; es decir mientras más altitud menor incremento en el diámetro del fuste. El piso bajo fue el que tuvo el mayor crecimiento 564.65 mm (5% más que el piso medio), seguido del piso medio 434.2 mm (12% más que el piso alto) y el piso alto 312.61 mm. En individuos menores a 30 años, el piso bajo tuvo 80.65 mm (13% más que el piso medio) de crecimiento; seguido del piso medio 59.20 mm (18% mayor que el piso bajo) y del piso alto 28.61 mm (17%). Cuando el rodal alcanzó entre 30 – 60 años), el crecimiento llegó hasta los 202 mm (10% más que el piso medio) en el piso bajo, 155 mm (11% mayor que el piso bajo) en el piso medio y 103 mm (22%) en el piso alto. Con los

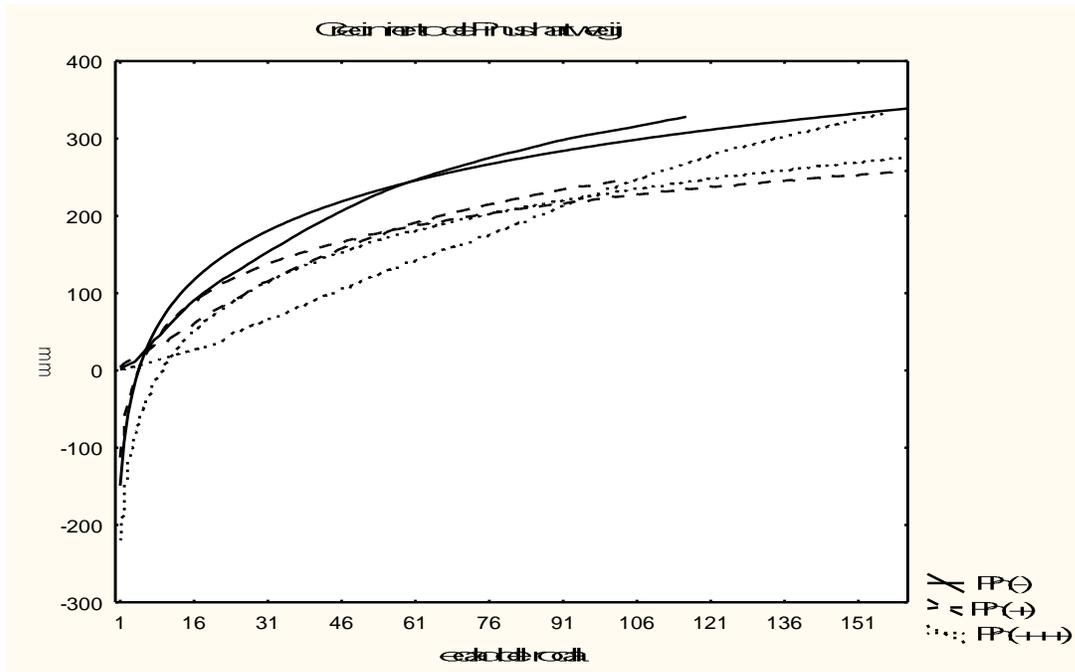
individuos de más de 90 años, la tendencia de crecimiento se estabilizó en el piso bajo 282 mm (9% mayor que el piso medio) y medio 220 mm (4% más que el piso bajo); sin embargo, el piso alto conservó un crecimiento del 20% por encima de las demás poblaciones (190 mm) ( $F(2,371) = 4.43, p = 0.01$ ) (figura 6a).

En promedio el ancho del anillo varió entre 0.2% y 7% entre los pisos altitudinales. El mayor ancho de anillo se encontró en la población de altitud media (1.75 mm); seguido del bajo (1.74 mm) y por último el piso alto (1.40 mm) ( $F(2, 371) = 5.09, p < 0.01$ ). Los individuos que llegan a los primeros 30 años decrecen significativamente en todos los pisos altitudinales: el ancho del anillo, 18% (2 mm) en el piso bajo, 8% (1mm) en el piso medio y 4% (1mm) en piso alto. La disminución del ancho del anillo de crecimiento continuo a lo largo de la vida de las poblaciones pero con una tasa menor que cuando alcanzan 60 años de edad; en los individuos más longevos de esta serie, el ancho promedio para los tres pisos altitudinales fue de un milímetro (figura 6b). El tamaño del ancho de la madera temprana no presentó diferencias significativas entre los pisos altitudinales. Sin embargo, es mayor en el piso bajo 2.3 mm (6% más que el piso medio) en relación al piso medio 1.9 mm (5% de diferencia con el piso alto) y el piso alto 1.6 mm. La madera tardía presentó diferencias significativas entre los pisos altitudinales. La mayor cantidad de madera tardía estuvo en el piso bajo (36%), seguido del piso medio (35%) y por último del piso alto (28%) ( $F(2,371) = 11.73, p < 0.01$ ) (figura 7). *Pinus hartwegii* tuvo una tendencia lineal negativa a disminuir el ancho de los anillos con relación al tiempo en los pisos medio y bajo, cuyas pendientes son mayores (-0.04 y -0.03, respectivamente) en comparación con el piso alto (-0.004). Las tres poblaciones se sincronizaron en el crecimiento del ancho de los anillos hacia principios de los años 50's, disminuyendo hasta un milímetro a principios de siglo ( $F(2,371) = 4.43, p = 0.01$ ) (figuras 8 y 9).

La fijación de carbono difirió significativamente entre los pisos altitudinales y edades de *P. hartwegii*. Las series se analizaron entre los 14 y los 85 años. El piso bajo almacenó la mayor cantidad de carbono por individuo arbóreo 53% (25.83 Mg C), seguido del piso medio 27% (13.26

Mg C) y por último el piso alto 18% (8.78 Mg C) ( $F(2,368) = 50.54, p < 0.01$ ) (figura 10). El piso bajo de pino en la etapa juvenil (0-30 años) almacenó 6% del total de carbono que acumularía hasta la actualidad (1.45 Mg C), en la madurez de su vida (30-60 años), incorporó 51% más (10.72 Mg C) y en la senectud (60-90 años) presentó un almacén de 15.11 Mg C. El piso medio tiene una tendencia semejante al bajo en relación a los porcentajes de carbono que se adicionan en cada una de las etapas de vida; sin embargo, difieren en la magnitud de carbono: el piso medio integró menos carbono a su rodal que el piso bajo. En la juventud, almacenó 0.65 Mg C, para la madurez adicionó 5.45 Mg C y en la senectud 8.2 Mg C a su biomasa. La dinámica de incorporación de carbono en el piso alto fue constante pero lenta en comparación con los otros dos pisos. En la etapa juvenil y hasta la madurez, se adicionaron entre 7% y 9% de carbono lo que equivale a 0.12 y 2.98 Mg C; el 33% del total de carbono que se determinó se incorporó a los árboles en las etapas adultas de la población (5.8 Mg C). El crecimiento de los pisos aún es positivo, por lo cual el carbono fijado no se ha estabilizado, además solo se tomó un intervalo de la edad de las poblaciones.

(a)



(b)

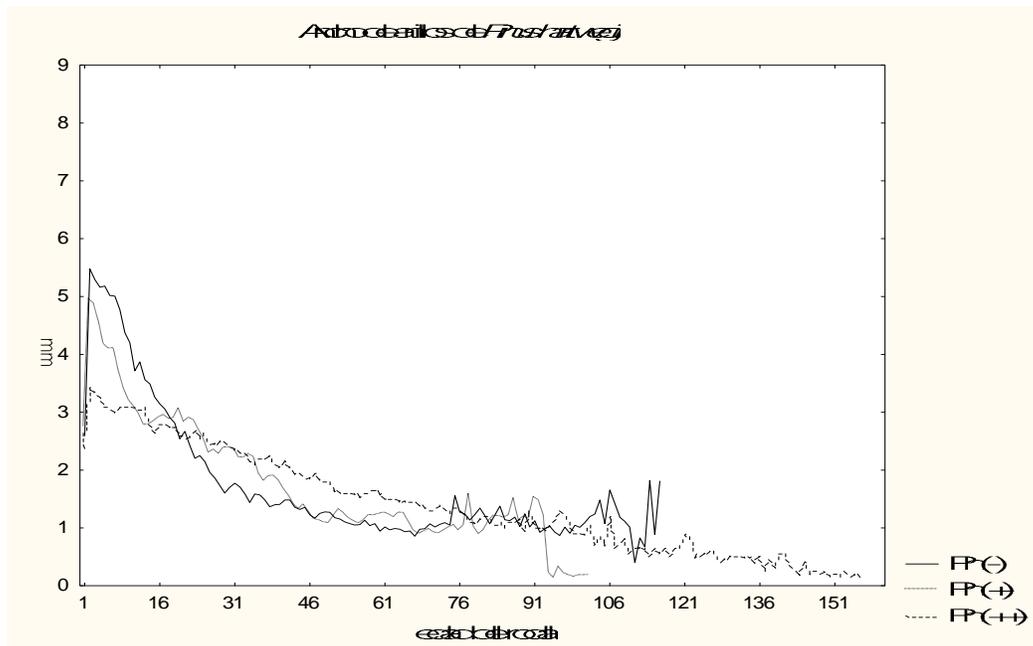


Figura 6 (a) crecimiento (mm) y (b) variación en el ancho del anillo de crecimiento (mm) de *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++).

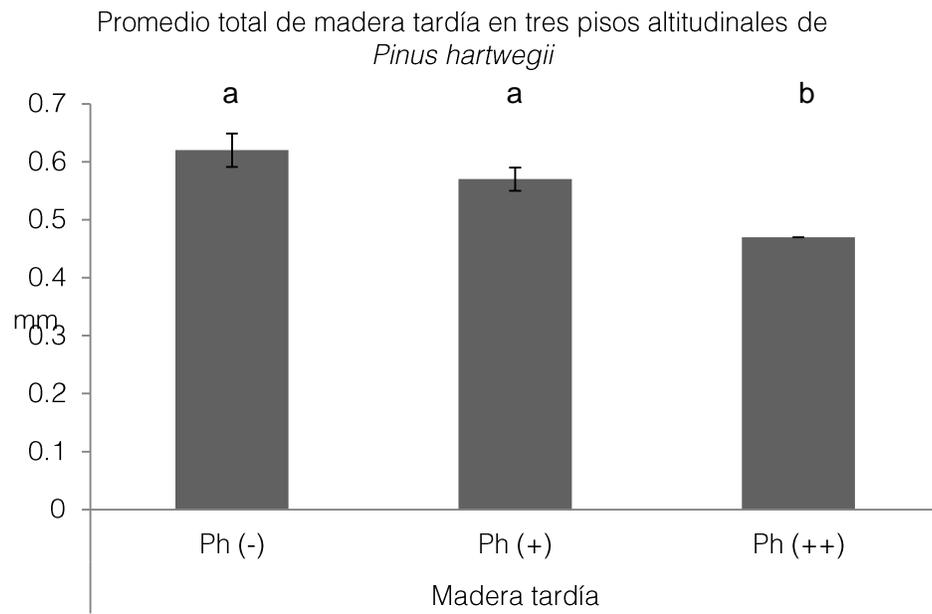


Figura 7. Promedio de del ancho de madera tardía (mm) de *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales, bajo (Ph-), medio (Ph+) y alto (Ph++) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

Ancho de anillo de la especie *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales.

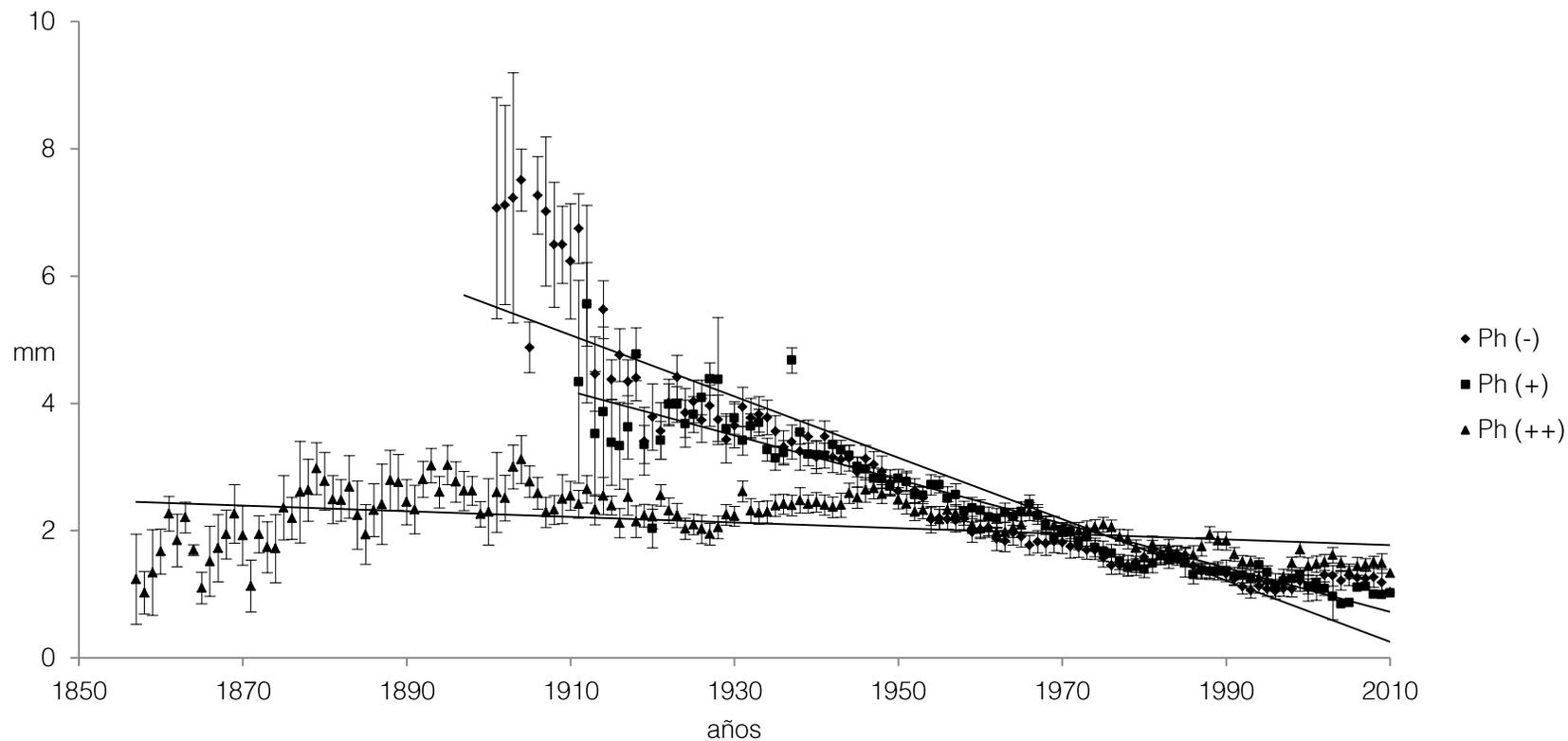


Figura 8. Variación temporal en el ancho de los anillos de crecimiento (mm) en *Pinus hartwegii* dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++)

Índices de anillo para la especie *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales

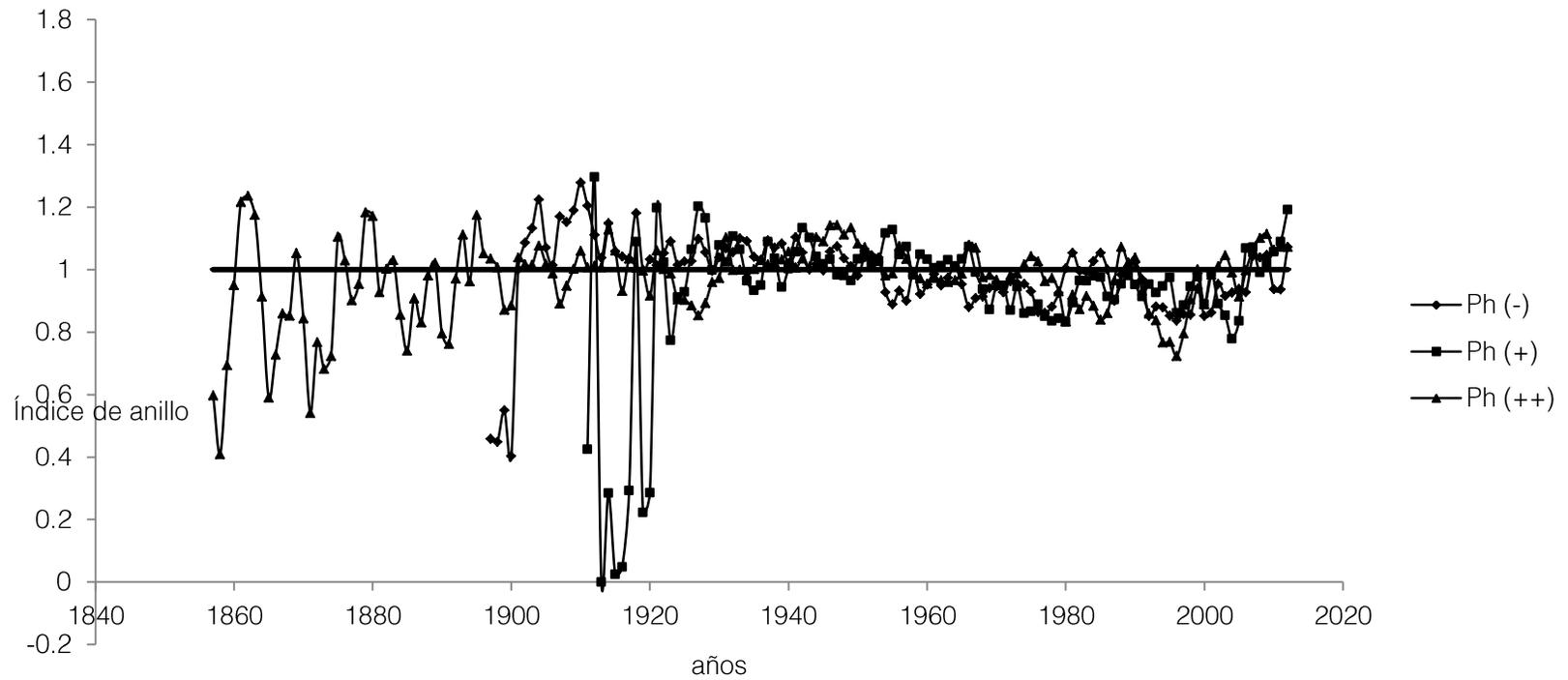


Figura 9. Estandarización del ancho del anillo de crecimiento de *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-), piso medio Ph (+) y piso alto Ph (++)

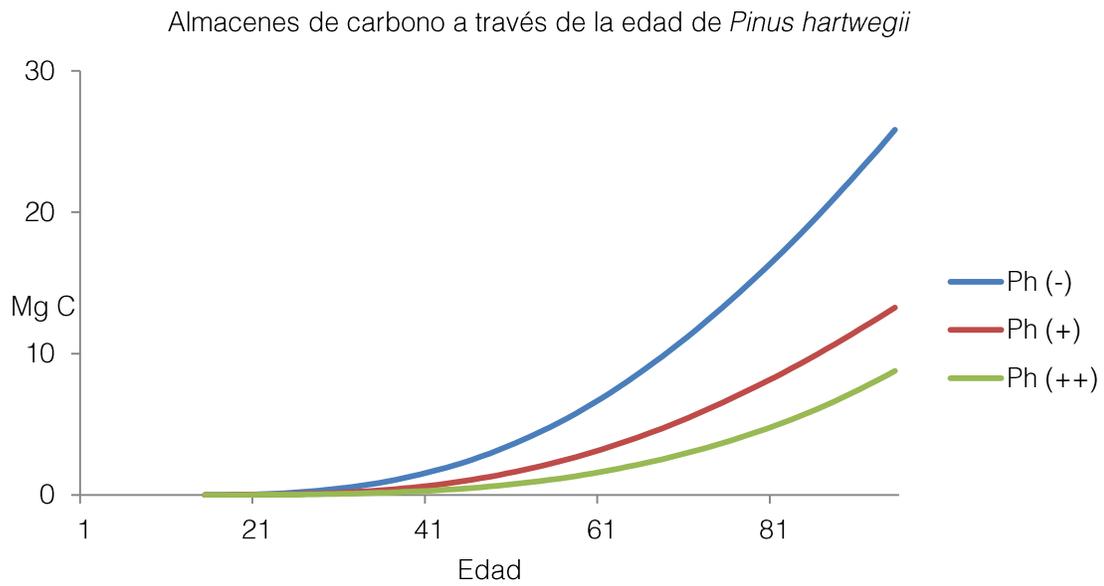


Figura 10. Carbono acumulado a lo largo de las diferentes edades de *Pinus hartwegii* en tres pisos altitudinales en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Piso bajo Ph (-) 3 400 m, piso medio Ph (+) 3 600 m y piso alto Ph (++) 4 000 m.

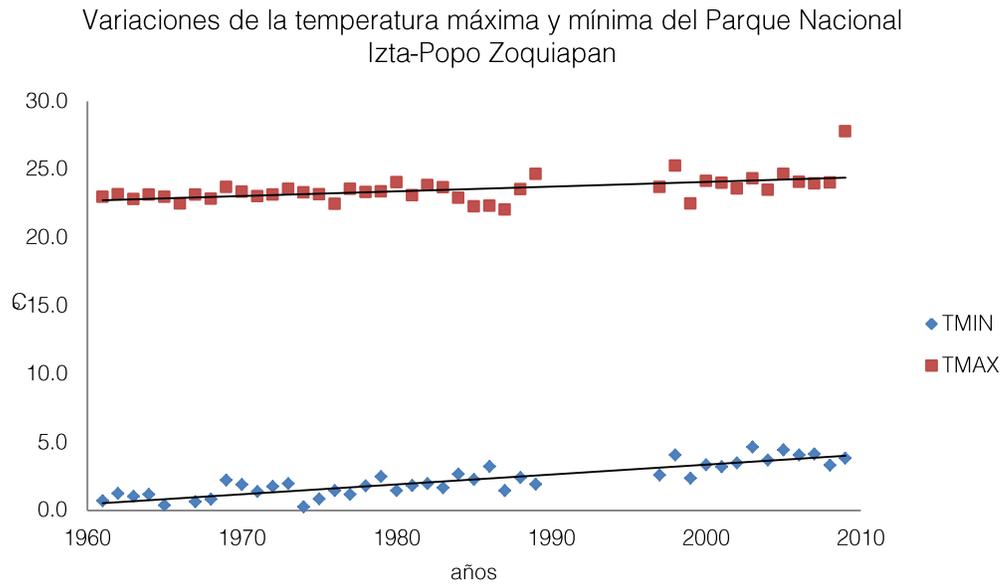
## 12.2. Influencia del clima en el crecimiento arbóreo

### 12.2.1. Descripción climática de la zona del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan y zonas aledañas entre los años 1961 a 2009

En el Parque Nacional Izta-Popo se observó un decremento en la precipitación total y un incremento en la temperatura en el periodo 1960-2009 (figuras 11 a y b). Los años con mayor temperatura máxima fueron 2009 (27.8 °C), 1998 (25.3°C) y 1989 (24.7 °C). Mientras que los años con menor temperatura mínima fueron 1966 (-0.3 °C), 1965 (0.4 °C) y 1967 (0.6 °C). En 1963 se registró el año con más precipitación (1149 mm año<sup>-1</sup>) seguido de 2006 (1143 mm año<sup>-1</sup>); y por último 1976 (1132 mm año<sup>-1</sup>). En 2009, 2005, 2008 y 1998 se presentaron los años con menos precipitación de toda la serie climática (622.3, 665.18, 695 y 700.3 mm año<sup>-1</sup> respectivamente).

Los meses de marzo, abril y mayo fueron el trimestre de mayor temperatura máxima (tmax) de toda la serie climática. Noviembre, diciembre y enero comprendieron los meses de menor temperatura mínima (tmin). Por otro lado, la precipitación total de la zona tuvo un comportamiento inverso a la temperatura, disminuyendo 2 mm en el trimestre con menos precipitación (diciembre - enero) y 10.5 mm en su trimestre más lluvioso (junio - agosto) respecto a los otros trimestres.

(a)



(b)

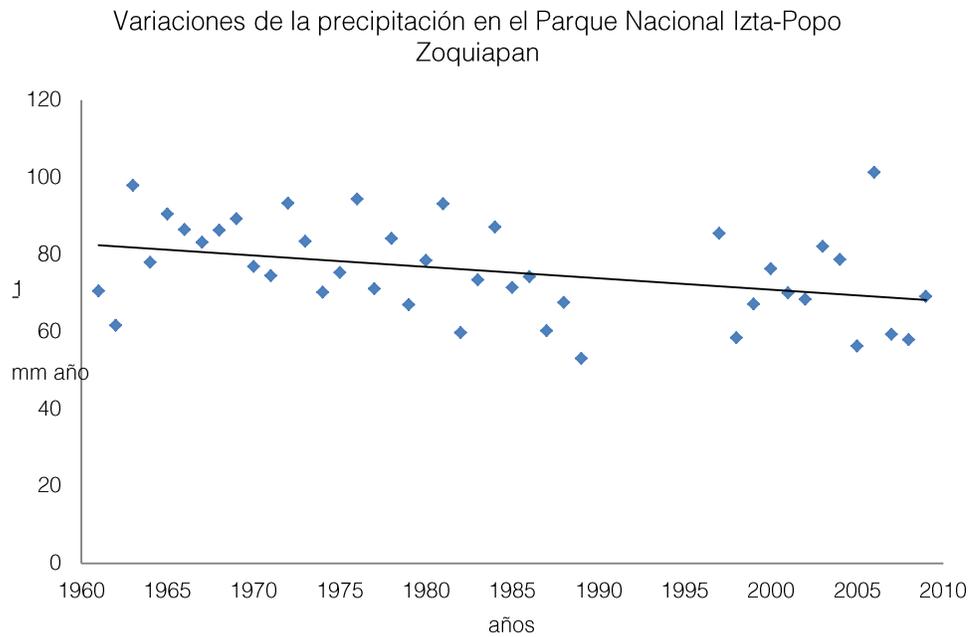


Figura 11. Variaciones anuales de la temperatura (a) y precipitación anual (b) del Parque Nacional Izta-Popo.

### 12.2.2. Factores climáticos y el ancho del anillo de crecimiento en *Abies religiosa*

Los factores climáticos con los que se relacionó el ancho de los anillos de *Abies religiosa* fueron diferentes en cada piso altitudinal. La precipitación explica el crecimiento en el piso bajo mientras que la temperatura explicó las tendencias de crecimiento en el piso alto (figura 12). Aunque nuestros transectos altitudinales abarcan múltiples variables que pueden cambiar de forma independiente (suelos, fertilidad, temperatura), estos análisis nos sugieren la importancia de la disminución lineal de la temperatura.

Las primeras lluvias del año (algunas iniciadas desde febrero) ejercieron una influencia negativa sobre el ancho del anillo de crecimiento en el piso bajo ( $r = -0.41$ ,  $r^2 = 0.17$ ;  $p < 0.01$ ), siendo la única variable climática que fue significativo para la correlación en este piso. Por otro lado, en el piso alto, a pesar de la baja correlación entre la  $t_{max}$  que coincide con los meses de la estación de lluvias, existió un aumento en el ancho del anillo en los meses de agosto ( $r = 0.48$ ,  $r^2 = 0.23$ ;  $p = 0.00$ ) y julio ( $r = 0.40$ ,  $r^2 = 0.16$ ;  $p = 0.01$ ). Asimismo, la  $t_{min}$  en el piso alto la correlación entre las variables no fue significativa, sin embargo, la temperatura mínima incremento el ancho de los anillos en los meses de agosto ( $r = 0.43$ ,  $r^2 = 0.18$ ;  $p < 0.01$ ), septiembre ( $r = 0.41$ ,  $r^2 = 0.17$ ;  $p < 0.01$ ) y julio en el piso alto ( $r = 0.38$ ,  $r^2 = 0.14$ ;  $p = 0.01$ ) (figura 12). La producción de madera tardía estuvo relacionada con los meses de noviembre y diciembre y la  $t_{min}$  ( $r = 0.42$ ,  $r^2 = 0.18$ ;  $p < 0.01$ , para ambos meses).

Los años con la mayor  $t_{max}$  2009, 1998, 1989 y 2005 explicaron moderadamente el incremento en el ancho del anillo en el piso bajo de *A. religiosa* ( $r = 0.53$ ,  $r^2 = 0.28$ ;  $p = 0.03$ ), mientras los años más lluviosos (2006, 1963, 1976) promueven el crecimiento en el piso bajo ( $r = 0.80$ ,  $r^2 = 0.65$ ;  $p = 0.00$ ) y alto ( $r = 0.86$ ,  $r^2 = 0.74$ ;  $p < 0.01$ ).

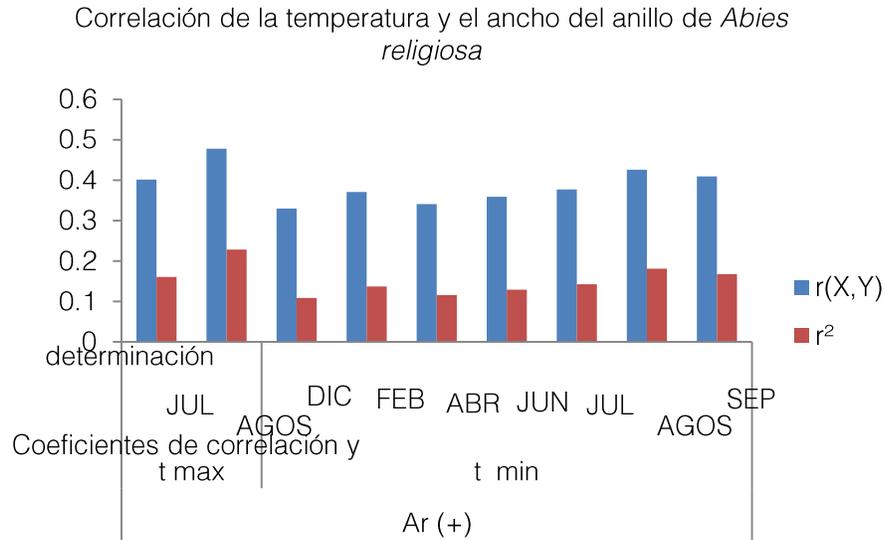


Figura 12. En la figura se muestran los meses que tuvieron una correlación significativa ( $r^2$ , barras rojas), así como la determinación positiva de los datos ( $r$ , barras azules) con la  $t_{min}$  y  $t_{max}$  con el ancho del anillo en el piso alto de *Abies religiosa* (3 300 m, Ar+) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).

### 12.2.3. Factores climáticos y en el ancho de los anillos de crecimiento en *Pinus hartwegii*

En el caso de *P. hartwegii*, sólo la temperatura tuvo relación con el ancho del anillo a lo largo del gradiente altitudinal y con la madera temprana y tardía. En el piso bajo, la disminución del ancho del anillo de crecimiento estuvo relacionada con la temperatura máxima ( $t_{max}$ ) en la estación de lluvias agosto ( $r = -0.49$ ,  $r^2 = 0.24$ ;  $p < 0.01$ ) y julio ( $r = -0.41$ ,  $r^2 = 0.17$ ;  $p = 0.01$ ); así como en invierno diciembre ( $r = -0.40$ ,  $r^2 = 0.16$ ;  $p = 0.01$ ); sin embargo, esta variable no explicó satisfactoriamente los cambios en los anchos de los anillos. En contraste, la temperatura mínima ( $t_{min}$ ) explica moderadamente la disminución en el ancho del anillo de crecimiento en el meses lluviosos de agosto ( $r = -0.74$ ,  $r^2 = 0.54$ ;  $p < 0.01$ ) y julio ( $r = -0.63$ ,  $r^2 = 0.40$ ;  $p = 0.00$ ) y en el mes seco como febrero ( $r = -0.64$ ,  $r^2 = 0.41$ ;  $p = 0.00$ ) (figura 13). En el piso medio, la temperatura máxima tuvo relación débil con la disminución del crecimiento del anillo en los meses de enero ( $r = -0.41$ ,  $r^2 = 0.17$ ;  $p < 0.01$ ) y diciembre ( $r = -0.39$ ,  $r^2 = 0.15$ ;  $p = 0.01$ ) que son secos y fríos. No

obstante, la temperatura mínima influyó en el poco crecimiento de los anillos en el mes más lluvioso de agosto ( $r = -0.71$ ,  $r^2 = 0.50$ ;  $p < 0.01$ ) y seco en mayo ( $r = -0.63$ ,  $r^2 = 0.40$ ;  $p < 0.01$ ), así como en la época de invierno en el mes de febrero ( $r = -0.62$ ,  $r^2 = 0.39$ ;  $p < 0.01$ ) desarrollando una relación moderada entre la  $t_{min}$  y el anillo (figura 14). Las correlaciones más bajas entre la temperatura y el ancho de los anillos de crecimiento estuvieron en el piso alto de *P. hartwegii*, aunque el número de eventos que se correlacionaron fueron mayores. Al igual que en el piso medio, la  $t_{máx}$  se relacionó débilmente con los anillos de crecimiento en los meses invernales diciembre ( $r = -0.43$ ,  $r^2 = 0.19$ ;  $p < 0.01$ ) y enero ( $r = -0.39$ ,  $r^2 = 0.15$ ;  $p < 0.01$ ) reduciendo el ancho de éstos. También la  $t_{min}$  en el mes de febrero ( $r = -0.61$ ,  $r^2 = 0.37$ ;  $p = 0.00$ ), primavera, en abril ( $r = -0.59$ ,  $r^2 = 0.35$ ;  $p = 0.00$ ) y en verano en el mes de julio ( $r = -0.58$ ,  $r^2 = 0.34$ ;  $p < 0.01$ ), redujo el crecimiento de los anillos (figura 15).

Por otro lado, la madera temprana, así como la tardía, fueron poco significativos así como de correlación para el piso medio y bajo de *P. hartwegii*. En el piso medio, la  $t_{máx}$  en un mes cálido como lo es abril aminoró la producción de madera temprana ( $r = -0.32$ ,  $r^2 = 0.10$ ;  $p = 0.03$ ), mientras que en el piso alto para el mismo mes, la aumentó ( $r = 0.35$ ,  $r^2 = 0.12$ ;  $p = 0.02$ ). En otoño, en el mes de noviembre, la  $t_{min}$  en el piso alto demeritó la formación de madera tardía ( $r = -0.34$ ,  $r^2 = 0.12$ ;  $p < 0.01$ ). Así como los años lluviosos 2006, 1963, 1976 y 1972 en el piso bajo ( $r = 0.84$ ,  $r^2 = 0.70$ ;  $p < 0.01$ ) y medio ( $r = 0.93$ ,  $r^2 = 0.86$ ;  $p < 0.01$ ) promovieron el aumento del ancho de los anillos; los años secos 2009, 2005 y 2002 decrecieron el ancho en el piso medio ( $r = -0.75$ ,  $r^2 = 0.57$ ;  $p < 0.01$ ).

En los tres pisos altitudinales de muestreo de *Pinus hartwegii* se observó una disminución del ancho del anillo con relación a la temperatura mínima en los meses de julio, agosto y febrero. Para el piso bajo y el alto, existió una correlación negativa entre la temperatura máxima y el ancho de los anillos de crecimiento para el mes de diciembre. En contraste el piso medio presentó una relación positiva entre la temperatura máxima y el ancho del anillo en los meses de enero y diciembre. La madera temprana correlacionó positivamente con la  $t_{máx}$  en el piso alto en abril, no

obstante este mismo factor climático disminuyó la cantidad de madera temprana en el piso medio para el mismo mes; además, la madera tardía presentó una correlación negativa con la tmin en el mes de noviembre. Por otro lado, la precipitación presentó una correlación positiva con el ancho del anillo en los pisos bajo y medio, mientras que los años secos disminuyeron el ancho del anillo en el piso medio de *P. hartwegii*.

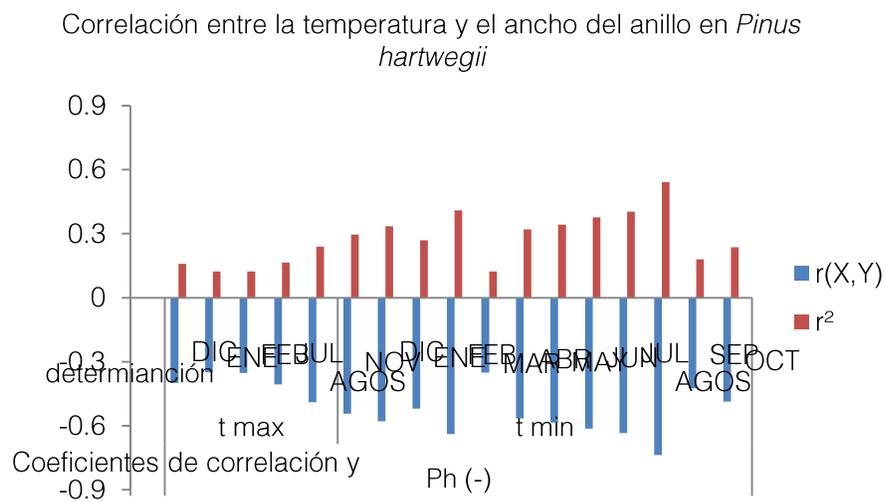


Figura 13. Se muestran los meses que fueron significativos para la t max y tmin con el ancho del anillo en el piso bajo de *Pinus hartwegii* (3 400 m, Ph -), la correlación se muestra en barras rojas ( $r^2$ ), la determinación fue negativa en todos los casos ( $r$ , barras azules) para el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).

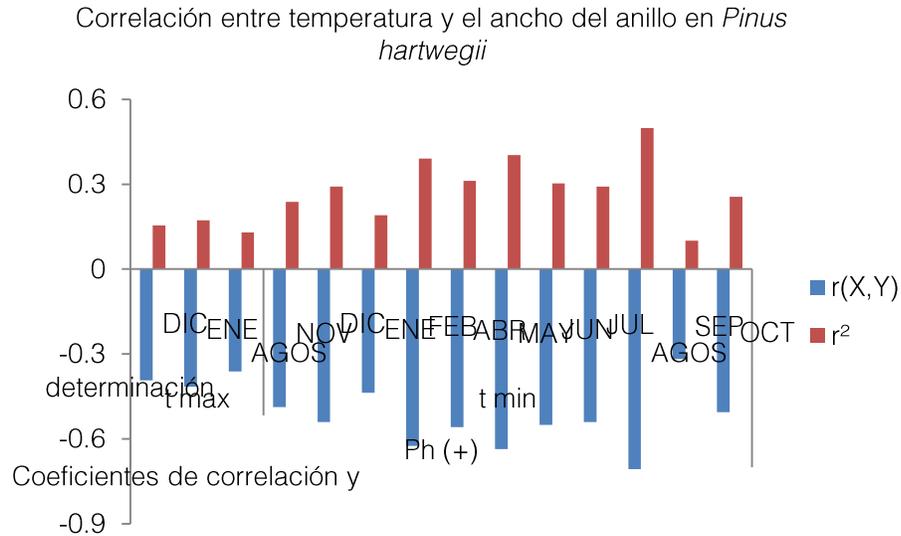


Figura 14. Se presentan los meses que fueron significativos en la correlación con el ancho del anillo de crecimiento y la t max y la t min ( $r^2$ , barras rojas) así como la determinación de la correlación ( $r$ , barras azules) las cuales fueron negativas en todos los casos del el piso medio de muestreo de *Pinus hartwegii* (3 600 m, Ph +), en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan ( $p < 0.01$ ).

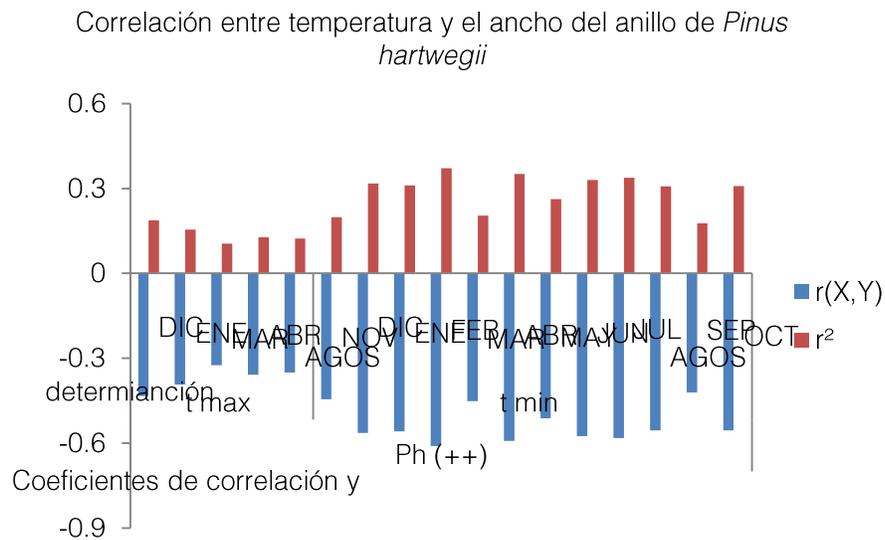


Figura 15. El piso alto de muestreo (4 000 m) de la especie *Pinus hartwegii* (Ph ++), en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan, todas las determinaciones fueron negativas ( $r$ , barras azules), la correlación con el ancho del anillo de crecimiento y la t max y la t min se muestra en barras rojas ( $r^2$ ) y fue mayor para los meses febrero y abril ( $p < 0.01$ ).

## 13. Discusión

### 13.1. Cambios en la temperatura y la precipitación en el Parque Nacional Izta-Popo

#### Zoquiapan y zonas aledañas

La variación climática de los últimos años tales como el incremento de la temperatura máxima en América Central y México a razón de 0.2 °C cada década (1960 – 2003) (Aguilar *et al.* 2005); así como de las temperaturas mínimas en promedio 2 °C en los últimos 50 años en el Nevado de Toluca y en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (Islas 2011) y la disminución de la precipitación invernal y monzónica del país provocan un déficit hídrico que reduce el contraste estacional entre la temporada de lluvias y secas en los ecosistemas templados como los que están en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (Méndez-González *et al.* 2008). Los efectos anteriores obedecen por un lado al aumento en la temperatura máxima y por otro a los efectos regionales durante la fase fría de los eventos de El Niño (ENSO) (Méndez-González *et al.* 2008). Por ejemplo, para la zona del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan la reducción en la precipitación en los años 2009, 1998 y 1989 siendo el año 2008 el año con más sequía se relacionan principalmente con eventos de El Niño (Méndez-González *et al.* 2008). Asimismo este fenómeno climático también ha influido significativamente en la precipitación de los últimos 14 años en la zona norte del país siendo cada vez más intensos y duraderos sus efectos en el ambiente y la vegetación (Cerano-Paredes *et al.* 2011). Estos cambios en la precipitación y la temperatura en la zona de estudio tendría repercusiones directas sobre las especies vegetales arbóreas dependientes de la humedad para su establecimiento y crecimiento como lo es *Abies religiosa* o de las variaciones estacionales de temperatura para la activación de la xylogenesis en el caso de *Pinus hartwegii* (Gómez-Guerrero *et al.* 2013).

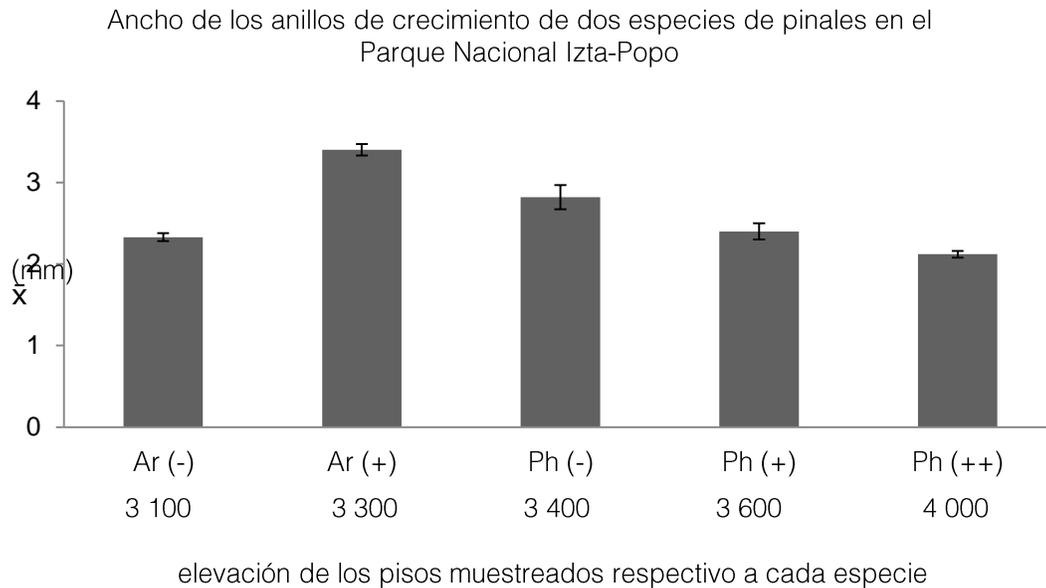


Figura 16. Promedio del ancho del anillo de crecimiento para *Abies religiosa* (piso bajo Ar- y piso alto Ar +), y *Pinus hartwegii* (piso bajo Ph -, piso medio Ph + y piso alto Ph ++) en un gradiente altitudinales (3 100 hasta los 4 000 m).

## 13.2. Anillos de crecimiento de dos especies de pinales

### 13.2.1. *Abies religiosa*

Los modelos de crecimiento para *Abies religiosa* mostraron la respuesta de la especie a la variación climática (Gómez-Guerrero *et al.* 2013). La tendencia temporal en los dos pisos elevacionales analizados en el presente estudio disminuyeron o aumentaron el ancho de los anillos de crecimiento en la misma década mostrando que la variabilidad climática generan una influencia en el crecimiento de *A. religiosa*. Esta especie depende de la humedad en el ambiente para su crecimiento (Gutiérrez 1990), durante las décadas de los 70 y 80 se observó una reducción del ancho de los anillos de crecimiento. En contraste, los anillos de crecimiento fueron mayores durante las décadas de 40 y 2000, esta variación fue de manera semejante en las dos poblaciones.

El ancho del anillo de *A. religiosa* refleja una gran tolerancia a las fluctuaciones de temperatura, sin embargo su factor limitante anualmente es la humedad. Se ha reconocido que eventos de sequías por eventos de ENSO estudiados en el norte del país generan una influencia sobre el crecimiento de los bosques en el centro de éste (Cerano-Paredes *et al.* 2011). Al igual que Arreola-Ortíz y Návar-Cháidez (2010) para la especie *Pseudotsuga menziessi* en Durango, se observa que después del estrés hídrico provocado por los eventos de El Niño en los años 1949-1962 y 1998- 2004 el incremento de la precipitación ejerció un mayor estímulo climático. Este fenómeno posiblemente puede explicar por qué en los individuos jóvenes del piso alto en comparación con los adultos del piso bajo de *Abies religiosa* presentando los anillos de crecimiento más anchos después de las sequías en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan.

Interanualmente el piso bajo de *Abies religiosa* presentó una reducción en el ancho de los anillos de crecimiento cuando se presentaron las primeras lluvias de febrero. Febrero es un mes seco y frío con algunas precipitaciones provenientes de los nortes, incrementando la disponibilidad de agua sin que la temperatura se eleve. En los meses junio, julio y agosto se termina la época de crecimiento de *Abies religiosa*, son lluviosos y tienen la temperatura propicia para que al aumentar la precipitación se el crecimiento de esta especie en la zona del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (Challenger 1998, Salazar y Terrazas 2000).

La relación entre la madera tardía con los meses invernales, noviembre y diciembre los cuales son fríos y secos sugiere un decremento en el ancho de los anillo debido a la latencia y la lignificación de las células (Salazar y Terrazas 2000). En especies de latitudes superiores, esta relación puede variar temporalmente, Miina (2000) determinó que la variación en el ancho de la madera tardía en pinus se debe principalmente a las primeras heladas en el mes de agosto, al igual que los abetos en México lo cual inicia la temporada de dormancia en la especie (Salazar y Terrazas 2000) (figura 17).

### 13.2.2. *Pinus hartwegii*

La elevación se ha determinado como el principal factor modulador sobre el crecimiento de los árboles en los límites superiores de vegetación en la zona del eje Neovolcánico Transversal de México (Gómez-Guerrero *et al.* 2013). La disminución en el crecimiento de los anillos respecto a la elevación en los tres pisos de *Pinus hartwegii* puede ser resultado de las bajas temperaturas y su duración, las heladas (2.85° C media anual con 85% de días de heladas después de los 3 900 m) y la reducción de la precipitación (900 mm anuales después de los 3 900 m) en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan (Gómez-Guerrero *et al.* 2013, Torres 2013).

Por otro lado la edad de los tres pisos de muestreo de *Pinus hartwegii* aumenta con la altitud. La escasa regeneración y perturbación antropogénica que se presentan en los pisos altos forman de manera indirecta la relación entre la altitud y la edad, como lo muestran Liang *et al.* (2010) para el Tibet en donde en las zonas más altas encontraron las cronologías más largas de *Abies georgeii*. A pesar de las modificaciones morfológicas y fisiológicas que adquieren los individuos arbóreos en la cima de la montaña, el piso elevado no mostró un decremento en su tasa de crecimiento conservando 20% en la tendencia hacia los próximos 50 años. Otros trabajos como el realizado por Gómez-Guerrero *et al.* (2013) también mostraron que los árboles no presentaron la disminución natural en el crecimiento propio de la senectud de las poblaciones. Sin embargo se ha documentado que el deshielo de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl ha brindado la apertura de nuevos nichos para el ascenso vertical de la especie, por encima de 4 300 m se han localizado individuos con <38 años que son los más jóvenes de la especie *P. hartwegii* a lo largo del gradiente altitudinal, los cuales están colonizando las partes más altas del ecosistema de montaña modificando la estructura vegetal de la población (Torres 2013).

La diferencia sobre el factor con mayor influencia en el crecimiento y por lo tanto del ancho de los anillos ha sido un tema ampliamente debatido. Vaganov *et al.* (1999) propusieron que la temperatura es el factor limitante en el crecimiento de las poblaciones de la cima de las montañas, mientras Lu-San *et al.* (2006) distinguieron a las lluvias de primavera y verano como las

moduladoras del ancho de los anillos de crecimiento en las poblaciones arbóreas de China. En México, Biondi y Hartsough (2010) monitorearon el crecimiento de *Pinus hartwegii* en el Nevado de Colima, y encontraron relaciones entre el ancho de los anillos de crecimiento con la temperatura y precipitación. Mencionan que antes de las lluvias monzónicas la temperatura es el principal factor estimulante del crecimiento seguido de la humedad. Asimismo encontraron a la precipitación del mes de Junio con la mayor influencia sobre el crecimiento del anillo de la especie, mientras que la temperatura y la radiación solar lo limitan en el mismo mes. La especie *P. hartwegii* del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan al igual que en el nevado de Colima tiene una relación inversa del crecimiento con la temperatura max y min en los pisos bajo y alto, sin embargo, a diferencia de Biondi y Hartsough (2010) los meses que marcaron la disminución del crecimiento fueron agosto y julio; además la precipitación no tuvo una relación significativa a pesar de ser el principal factor que influye sobre el crecimiento de la especie en el mes de Junio (Biondi y Hartsough 2010).

*P. hartwegii* redujo el ancho de los anillos y de la madera temprana (marzo-abril) a pesar del aumento de temperatura y precipitación en primavera-verano, la sensibilidad a los niveles de humedad después de la estación de lluvias está dada por la influencia negativa de la radiación solar sobre el crecimiento como producto de la nubosidad en esos meses (Biondi y Hartsough 2010). Además, se incrementa la transpiración y respiración como resultado del incremento de las temperaturas mínimas y la poca disponibilidad de agua capilar mermando el crecimiento de los anillos y de madera tardía en los meses de invierno (diciembre y febrero) (Gutiérrez1990) (figura 17).

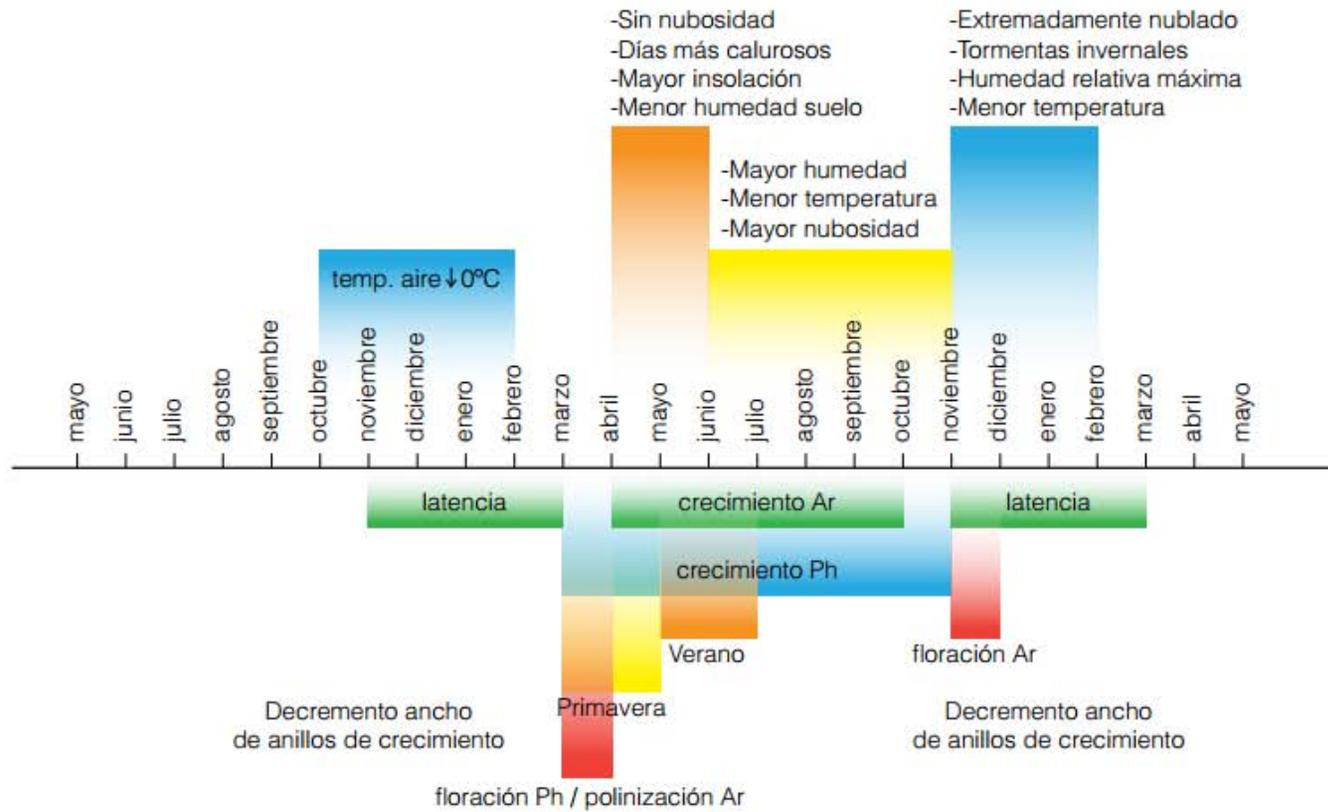


Figura 17. Fenología general de *Abies religiosa* (Ar) y *Pinus hartwegii* (Ph).

#### 14. Conclusión

Las especies de pinales del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan conservan su tendencia de crecimiento, además los efectos del clima externos afectan de manera directa el crecimiento de *Abies religiosa*, la precipitación regula el crecimiento del piso bajo y la temperatura lo hace en el piso alto independiente de la altitud de establecimiento. Por otro lado *Pinus hartwegii* presentó una mayor respuesta a la elevación en el establecimiento de sus poblaciones, siendo la temperatura el factor climático que ejerce una influencia directa sobre su crecimiento. La altitud y su influencia sobre la precipitación y la temperatura cambian la respuesta de crecimiento en cada especie.

El carbono almacenado en las especies estudiadas y en sus pisos elevacionales al igual que su crecimiento sigue incrementando. Algunos eventos de la variabilidad climática con el fenómeno de El Niño generan una respuesta positiva en el crecimiento de la vegetación del parque como es el caso de *A. religiosa*, modificando los almacenes de carbono arbóreo, asimismo en *P. hartwegii* los almacenes siguen incrementándose a pesar de la edad de las poblaciones. En este trabajo se ha estimado que pueden servir como sumideros de carbono al menos por 50 años más debido a que la mayor fijación se reportó en la etapa madura de esta población.

## 15. Consideraciones finales

El Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan cuenta con una de las reservas más extensas de bosques templados de México. A través de los gradientes altitudinales que se generan en las montañas, la vegetación interactúa con la topografía y el clima, lo cual establece poblaciones arbóreas mono-específicas a través de los patrones espaciales de nutrientes y recursos (Heil et al. 2003).

La biomasa arbórea y el carbono almacenados en las poblaciones de *Pinus montezumae*, *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* mostró variaciones respecto a los pisos altitudinales de muestreo de las especies estudiadas así como en sus clases diamétricas y densidad arbórea (Salazar y Terrazas 2000). Asimismo los factores de corrección no fueron necesarios debido a que existen ecuaciones alométricas específicas para cada especie.

Además, el ancho de los anillos de crecimiento se modificaron a través de los gradientes de altitud, entonces la temperatura y la precipitación tienen implicaciones directas sobre los anillos de crecimiento de las especies (*A. religiosa* y *P. hartwegii*) (Gómez-Guerrero et al. 2013). Por un lado la persistencia del estrés genera una disminución escalonada de los anchos de anillos de crecimiento en *Pinus hartwegii*, mientras que la tendencia de crecimiento de *Abies religiosa* responde a los eventos climáticos externos como lo es el evento de El Niño.

Los almacenes de biomasa arbórea se incrementaron con la edad del individuo, el diámetro del fuste aumentó de tamaño a través del tiempo incorporando más carbono y biomasa; mientras que el ancho de los anillos disminuyeron a lo largo de las etapas de vida del árbol siendo menores en la etapa adulta; lo cual genera una relación inversa entre la acumulación de biomasa y el crecimiento de los árboles (figura 1) (Gómez-Guerrero et al. 2013). Sin embargo, poblaciones de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* registradas en este estudio no han dejado de crecer independientemente de la madurez de la vegetación incorporando biomasa y carbono a las poblaciones.

La respuesta de los bosques al aumento de temperatura, CO<sub>2</sub> y la disminución de la precipitación varía entre especies, puede generar una influencia rápida sobre el crecimiento de *Pinus montezumae* y *Abies religiosa* que son especies que responden a los factores climáticos externos. Mientras que *Pinus hartwegii* es una especie amenazada por el incremento de temperatura y de evaporación del recurso hídrico en las cimas de la montaña, lo que llevaría a su extinción en el futuro o al avance vertical hacia zonas frías como se ha registrado en otros trabajos (Torres 2013).

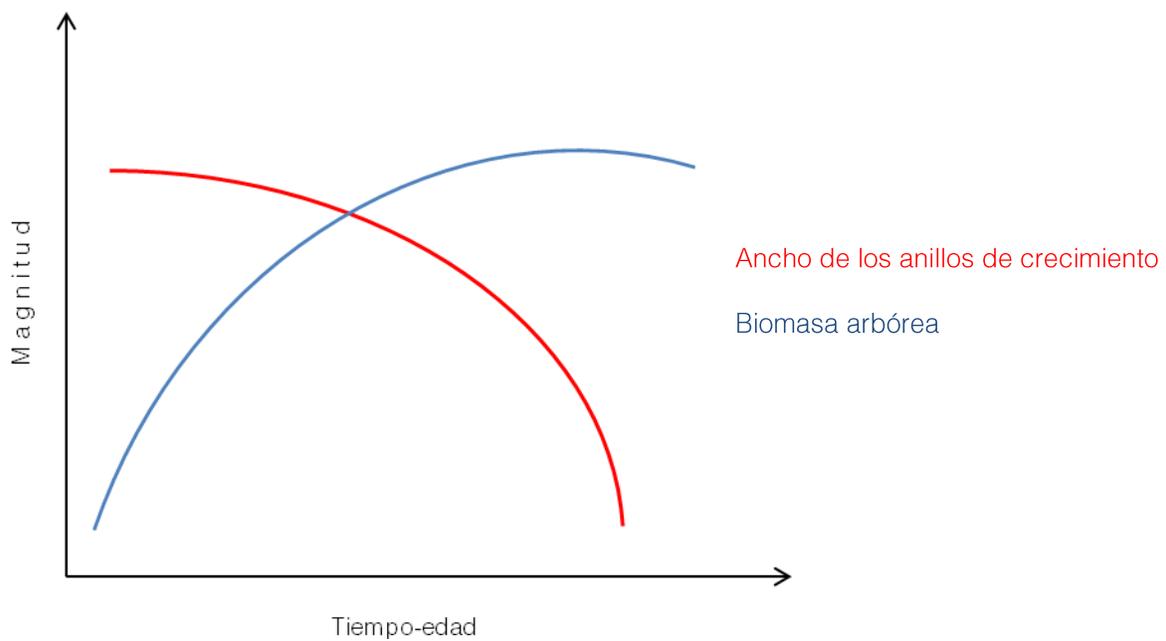


Figura 1. El ancho de los anillos de crecimiento se muestra en rojo, mientras en azul se representa la biomasa arbórea a través de la edad de las poblaciones forestales.

## Referencias

- Aguilar E, Peterson T, Ramírez Obando P, Frutos R, Retana JA, Solera M, Soley J, GonzalezGarcia I, Araujo R, Rosa Santos A, Valle V, Brunet M, Aguilar L, Alvarez L, Bautista M, Castanon C, Herrera L, Ruano E, Sinay J, Sanchez E, Hernandez Oviedo G, Obed F, Salgado J, Vazquez J, Baca M, Gutierrez M, Centella C, Espinosa J, Martinez D, Olmedo B, Ojeda Espinoza C, Nunez R, Haylock M, Benavides H y Mayorga R (2005) Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research* 110:D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Arreola-Ortíz M y Návar-Cháidez J (2010) Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El niño en el nordeste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 71:7-20.
- Bernal S y Terrazas T (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Maderas y Bosques* 6(001):73-86.
- Bickford I, Fulé P y Kolb T (2011) Growth sensitivity to Drought of Co-Occurring *Pinus* sp. Along an Elevation Gradient in Northern Mexico. *Western North America Naturalist* 71(3):338-348.
- Biondi F y Hartsough (2010) Using automated point Dendrometers to Analyze tropical treeline stem growth at Nevado de Colima, Mexico. *Sensors* 10:5827-5844
- CONANP (2011) Biodiversidad del Parque Nacional. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Fecha de consulta agosto 2011.
- Coníferas de México (2011) *Abies religiosa* <http://chestofbooks.com/reference/American-Cyclopaedia-V7/index.html>, Fecha de consulta agosto 2011.
- Cerano-Paredes J, Villanueva-Díaz J, Valdez-Cepeda R, Arreola-Ávila J, Constante-García V (2011) El niño oscilación del sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la Cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17:207-215.

- Challenger A (1998) Utilización de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), Ciudad de México, México.
- Farjon, A. y Styles, B. (1997). Flora Neotropica Monograph 75, *Pinus* (Pinaceae). EUA The New York Botanical Garden. Bronx, New York. 239. págs.
- Ficha técnica CONAFOR (2011) *Abies religiosa* <http://www.conafor.gob.mx>. Fecha de consulta agosto 2011
- García L, Guindeo Casasús A, Oramas Peraza C, de Palacios de Palacios P (2003) La madera y su anatomía. Madrid. Fundación conde del Valle de Salazar/Mundi prensa. 1era edición. pp 327
- Gómez-Guerrero A, Silva L, Barrera-Reyes M, Kishchuk B, Velázquez-Martínez A, Martínez-Trinidad T, Plascencia-Escalante F y Horwath W (2013) Growth decline and divergent tree ring isotopic composition ( $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) contradict predictions of CO<sub>2</sub> stimulation in high altitudinal forest. *Global Change Biology* 19:1748-1758.
- González-Elizondo M, Jurado E, Nívar J, González-Elizondo M, Villanueva J, Aguirre O y Jiménez J (2005) Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213:39-53.
- Gutiérrez E (1990) Dendroecología de *Pinus sylvestris* L. en Cataluña. *Orsis* 5:23-41.
- Heil G, Bobbink R, Boix N (2003) Ecology and Man in Mexico's Central Volcanoes Area. Londres. Kluwer Academic Publishers. 222 págs
- IPCC (2011) Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Tercer Reporte de Evaluación. Contribución de los Grupos de Trabajo al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012

- IPCC (2011) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y A. Reisinger (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza. <http://www.ipcc.ch/languages/spanish.htm>. Fecha de consulta enero 2012
- Islas CH (2011). Análisis de la tendencia de nevadas en la Sierra Nevada, México. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y letras, Universidad Nacional Autónoma de México, págs. 179.
- Körner C (2007) The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 22(11):569-574.
- Körner C (1998). A re-assessment of the high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*. 115:445-459.
- Lebourgeois F, Rathgeber C y Ulrich E (2010) Sensitivity on French temperate coniferous forest to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Piceaabies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science* 21:364-376.
- Liang E, Wang Y, Xu Y, Liu B y Shao X (2010) Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Trees* 24:6363-373.
- Littell J, Peterson D y Tjoelker M (2008) Douglas-Fir growth in mountain ecosystems: water limits tree growth from stand to region. *Ecological Monographs* 78(3):349-368.
- Lu-San L, Xue-Mei S y Er-Yuang L (2006) Climate Signals from Tree Ring Chronologies of the Upper and Lower Treelines in the Dulan Region on the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of IntegrativePlantBiology* 48(3):278-285.
- Martínez G (2011) Índices de anillos de crecimiento en coníferas del eje neovolcánico transversal de México. Maestría. Colegio de Postgraduados.

- McMahon SM, Parker GG y Miller DR (2010) Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(8):3611-3615.
- Méndez-González J, Návar-Chiádez J y González-Ontiveros V (2008) Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas (mx)* 65:38-55
- Miina J (2000) Dependence of tree-ring, earlywood and latewood indices of Scots pine and Norway spruce on climatic factors in Eastern Finland. *Ecological Modelling* 132:25—273.
- Ricker M, Gutiérrez-García G y Daly D (2007) Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Research* 37:977-989.
- Roig F, Fernandez M, Gareca E, Altamirano S y Monge S (2001) Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la Pauna. *Boliviana Revista Boletín Ecológico* 9:3-13.
- Salazar S y Terrazas S (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y bosques* 6(001):73-86.
- Salzer M, Hughes M, Bunn A y Kipfmüller K (2009) Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(48):20348-20353.
- Splechtna B, Dobry J y Klinka K (2000) Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) in relation to elevation and climatic fluctuations. *Annals of Forest Science* 57:89-100.
- Stokes M y Smiley T (1996) *An introduction to Tree-ring dating*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Torres B (2013) Análisis de los cambios del límite superior del volcán Iztaccíhuatl. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. 122 págs.
- Vaganov E, Hughes M, Kirilyanov A, Schweingruber F y Silkin P (1999) Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature* 400:149-151.

Villanueva J, Stahle D, Cleaveland M y Therrell M (2000) Estado actual de la dendrocronología en México. Revista Ciencia Forestal en México 25(88):5-36.