



Universidad Veracruzana
Universidad Veracruzana

Región Xalapa

Maestría en Ciencias en Ecología Forestal

**Estimación de biomasa y carbono aéreo en el bosque de
Pinus hartwegii Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote**

Tesis para obtener el grado de Maestra en
Ciencias en Ecología Forestal

Presenta:

Odettee Isabel Cadena Morales

Director de tesis:

Dr. Héctor Viveros Viveros

Junio de 2022

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Instituto de Investigaciones Forestales
Región Xalapa

Maestría en Ciencias en Ecología Forestal

*Estimación de biomasa y carbono aéreo en el bosque de Pinus
hartwegii Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote*

Tesis para obtener el grado de Maestra en
Ciencias en Ecología Forestal

Presenta:
Odettee Isabel Cadena Morales

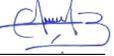
Director de Tesis:
Dr. Héctor Viveros Viveros

Codirector: Dr. Miguel Acosta Mireles
Asesores: Dra. Susana Guillen Rodríguez
Dr. Armando Aparicio Rentería
Dr. Lázaro Rafael Sánchez Velásquez

Aprobación del documento final de tesis de grado:

“Estimación de biomasa y carbono aéreo en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote”

Realizada por la alumna Biól. Odettee Isabel Cadena Morales, bajo la dirección del Comité Tutorial de tesis y aprobada por el Comité Revisor. Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de: **Maestra en Ciencias en Ecología Forestal.**

	Nombre	Firma
Director(a) de tesis	Dr. Héctor Viveros Viveros	 _____
Codirector (a):	Dr. Miguel Acosta Mireles	 _____
Asesores	Dra. Susana Guillen Rodríguez	 _____
	Dr. Armando Aparicio Rentería	 _____
	Dr. Lázaro Rafael Sánchez Velásquez	 _____
Comisión Revisora	Dra. Rosa Amelia Pedraza Pérez	 _____
	Dr. Marcos Jiménez Casas	 _____
	Dr. Fernando Carrillo Anzures	 _____

Xalapa, Ver. junio del 2022



DECLARACIÓN

Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por Odettee Isabel Cadena Morales como estudiante de la Maestría en Ciencias entre agosto del 2019 y febrero del 2022, bajo la supervisión del Dr. Héctor Viveros Viveros y el Dr. Miguel Acosta Mireles.

Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

Candidato: Odettee Isabel Cadena Morales

Director de tesis: Dr. Héctor Viveros Viveros

Codirector de tesis: Dr. Miguel Acosta Mireles

Dedicatoria

A mi hija Iriel... te amo con todo mi corazón...

A mi padre... Por darme esa fortaleza inquebrantable...

A mi madre... Con amor hasta el cielo mami...

Agradecimientos

A mi director de Tesis, Héctor Viveros Viveros, por su paciencia y enseñanzas, por su entrega de conocimiento para realizar este trabajo y por su apoyo incondicional.

A mis profesores del Instituto de Ciencias Forestales, aprendí de cada uno de Uds. muchas cosas maravillosas, una vez más he ratificado el amor por mi carrera y por lo que hago. Muchas gracias a todos.

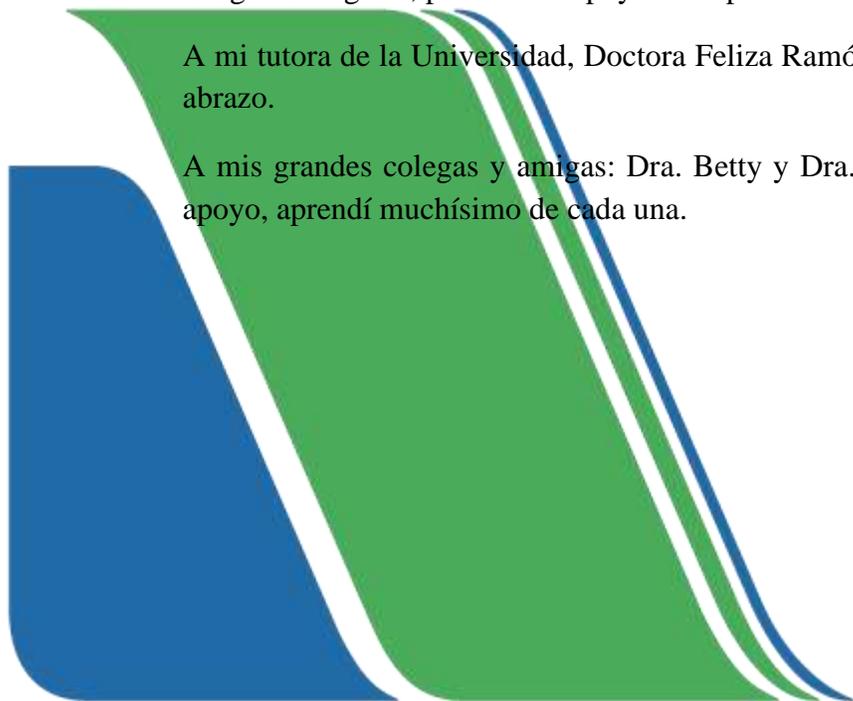
A mi apoyo en campo, mi esposo Oscar Iván López Molinar, gracias por todo tu apoyo en la fase de muestreo, fuiste pieza clave para la conclusión de este hermoso trabajo.

A mi hermana, Flor por siempre motivarme siempre, apoyarme y jamás dejarme caer, te amo hermana.

A mi amiga, la Doctora Ángeles Soriano, a mis amigos Doctores Héctor de los Santos y Gregorio Ángeles, por todo el apoyo en el proceso de mi posgrado.

A mi tutora de la Universidad, Doctora Feliza Ramón Farías, por sus consejos y apoyo. Un abrazo.

A mis grandes colegas y amigas: Dra. Betty y Dra. Susana, gracias por ánimos, aliento y apoyo, aprendí muchísimo de cada una.



Índice

Dedicatoria	2
Agradecimientos	2
Índice general.....	3
Índice de tablas y figuras.....	4
Resumen.....	5
Introducción	6
Antecedentes.....	9
Bosques templados de coníferas en México y Veracruz.....	9
Captura de carbono en función de la biomasa en bosques templados del mundo y en México.....	9
Importancia de las ecuaciones alométricas en la estimación de biomasa y carbono.....	12
Biomasa y carbono en bosques templados a lo largo de gradientes altitudinales.....	14
Hipótesis.....	17
Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivo específico	17
Materiales y métodos.....	18
Clima.....	18
Vegetación.....	19
Suelos.....	19
Muestreo.....	20
Medición en campo	22
Estimación de biomasa y carbono.....	22
Análisis estadístico.....	24
Resultados.....	25
Estimaciones generales de biomasa y carbono en el bosque de <i>P. hartwegii</i>	25
Biomasa y carbono por especie.....	26
Variación altitudinal de biomasa y carbono.....	26
Discusión.....	28
Estimaciones generales de biomasa y carbono.....	28
Biomasa y carbono por especie.....	30
Influencia de la altitud en la cantidad de biomasa y carbono.....	31
Conclusión.....	32
Referencias.....	33

Índice de figuras y tablas.

FIGURAS

Figura 1. Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz (CONANP, 2015).....	18
Figura 2. Pisos altitudinales donde se establecieron los sitios de muestreo.....	20
Figura 3. Diseño del conglomerado tipo INFyS con sitios circulares para la recolección de información para la estimación de biomasa y carbono.....	21
Figura 4. Medición de diámetro normal (DN) en árboles a) en distintas condiciones topográficas y b) tronco bifurcado.....	22
Figura 5. Cantidad de biomasa en <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Abies religiosa</i> en el Cofre de Perote, Veracruz.....	26
Figura 6. Cantidad de carbono en <i>Pinus hartwegii</i> y <i>Abies religiosa</i> en el Cofre de Perote, Veracruz.....	26
Figura 7. Patrón de variación altitudinal de la cantidad de biomasa en un bosque de <i>P. hartwegii</i> del Cofre de Perote, Veracruz.....	27
Figura 8. Patrón de variación altitudinal de la cantidad de carbono en un bosque de <i>P. hartwegii</i> del Cofre de Perote, Veracruz.....	28

TABLAS

Tabla 1. Promedios generales y medidas de dispersión de la cantidad de biomasa y carbono del A) bosque de <i>Pinus hartwegii</i> , B) del arbolado con DN ≥ 7.5 cm y C) juvenil (DN < 7.5 cm).....	25
Tabla 2. Cantidad de biomasa y carbono en bosques de clima templado frío.....	29
Tabla 3. Cantidad de biomasa y carbono en <i>A. religiosa</i> y algunas especies de pino.....	30

Resumen

Los bosques de pino contribuyen a disminuir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, dado que lo almacenan en forma de biomasa. El gradiente altitudinal influye en la producción de biomasa y captura del carbono. En México, *Pinus hartwegii* Lindl. se distribuye de los 3,000 a los 4,300 m s.n.m., siendo la especie que marca el límite superior de la distribución altitudinal de las especies arbóreas en el país, por lo que es idónea para estudiar el efecto de la altitud sobre la cantidad de biomasa y carbono en gradientes altitudinales. El objetivo del presente estudio fue estimar la cantidad de biomasa y carbono en árboles adultos y juveniles de *Pinus hartwegii*, en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. En esta área se realizó un muestreo estratificado por conglomerado con 32 sitios de forma circular (400 m²), en tres pisos altitudinales: 3,500, 3,800 y 4,100 m s.n.m. En cada sitio, a los árboles con diámetro normal (DN) ≥ 7.5 cm se les midió el DN mientras que a los árboles con DN < 7.5 cm o con altura < 1.3 m se les midió el diámetro basal (DB). La biomasa (B) en árboles pequeños fue estimada mediante la ecuación alométrica: $B=0.0092*DB^{2.7315}$ y el carbono se obtuvo al multiplicar la biomasa por el factor de 0.48; en el arbolado adulto la biomasa y el carbono se estimaron mediante las ecuaciones alométricas: $B= 0.0635DN^{2.4725}$ y $C= 0.0332DN^{2.5104}$, respectivamente. La cantidad promedio de biomasa fue de 102.808 ± 12.529 Mg ha⁻¹ y la de carbono fue de 49.888 ± 6.066 Mg ha⁻¹. El arbolado con DN ≥ 7.5 cm presentó en promedio 102 ± 12.588 Mg ha⁻¹ de biomasa y 49 ± 6.081 Mg ha⁻¹ de carbono. Por otro lado, el arbolado juvenil (con DN < 7.5 cm) presentó en promedio una biomasa de 0.7 ± 0.138 Mg ha⁻¹ y 0.3 Mg ha⁻¹ de carbono. El patrón de variación altitudinal de la biomasa y el carbono mostró una tendencia lineal negativa. Por lo que se concluye que a medida que la elevación de los sitios de muestreo aumentó, la cantidad de biomasa disminuyó; por lo que los resultados encontrados concordaron con la hipótesis planteada.

Palabras clave: Biomasa, ecuaciones alométricas, pisos altitudinales

I. INTRODUCCIÓN

El carbono (C) junto con el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo, constituyen los elementos primarios que soportan la vida en la tierra (Martínez & Fernández-Bremauntz, 2004). Particularmente el carbono, es el decimoquinto elemento más abundante en la corteza terrestre y forma parte fundamental en los ciclos biogeoquímicos y cuando se combina con el oxígeno produce moléculas de bióxido de carbono (CO₂), uno de los gases implicados en el efecto invernadero (Martínez & Fernández-Bremauntz, 2004; Paul, 2015). En los últimos años existen registros de un incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo, lo que ha ocasionado alteraciones en la temperatura del planeta (IPCC, 2014).

Los océanos, el suelo, la atmósfera y la vegetación constituyen los principales reservorios de carbono, tan solo las selvas tropicales, pastizales, matorrales y bosques templados llegan a captar de 350 a 680 Gt de C anuales (SEMARNAT, 2009; Smith *et al.*, 2015). Los bosques templados tienen un papel relevante en la mitigación del cambio climático, ya que a nivel mundial son excelentes sumideros de CO₂ al acumularlo en su biomasa (FAO, 2013). Este tipo de bosques en México se distribuyen en la Sierra Madre Occidental (34.5 %), Sierra Neo Volcánica (26.3 %), Sierra Madre del Sur (23.8 %) y otras regiones de la República Mexicana con clima templado (15.4 %) (Gernandt y Pérez-De La Rosa, 2014). De estos bosques el 66.4 % está constituido por coníferas y el 33.6 % por latifoliadas, que en conjunto cubren una superficie nacional aproximada de 1,958,201 km². En referencia a las coníferas, México es considerado un centro secundario de diversificación del género *Pinus*, con 49 de las aproximadamente 120 especies en el mundo (40%), las cuales tienen gran importancia económica, sus bosques sirven como hábitat de fauna y brindan servicios ambientales, como la captura y el almacén de carbono (Challenger & Soberón, 2008; Gernandt & Pérez-De La Rosa, 2014).

A nivel mundial, los bosques templados se encuentran distribuidos a lo largo de gradientes altitudinales, que van del nivel del mar a un poco más de 4,000 m (Gernandt & Pérez-De La Rosa, 2014). Estudios recientes han documentado que el gradiente altitudinal puede tener efectos sobre la cantidad de biomasa y carbono en los árboles de diferentes especies forestales, debido a que conforme aumenta la elevación, la temperatura disminuye

e incrementa la humedad, condicionando la productividad de la vegetación (Gao *et al.*, 2019; Eshetu & Hailu, 2020). Por lo que la cantidad de biomasa y carbono en árboles distribuidos en gradientes altitudinales, puede presentar alguno de los siguientes dos patrones: (a) mayor cantidad de biomasa y carbono en árboles creciendo en sitios de menor altitud, respecto de aquellos que se encuentran a mayor altitud (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013) o (b) se puede encontrar una mayor cantidad de biomasa y carbono en altitudes intermedias, con respecto a los árboles de las altitudes extremas (menor y mayor altitud); estos patrones dependen de las condiciones ecológicas presente en los sitios de crecimiento de cada especie (Yohannes, 2015), además, se debe considerar que las peculiaridades o características ecológicas regionales o locales pueden influir en los patrones para cada montaña (Körner, 2007).

En México, *Pinus hartwegii* Lindl. se distribuye de 3,000 a 4,300 m s.n.m. siendo la especie arbórea que crece a mayor altitud (Gutiérrez & Trejo, 2014). Por lo que es una especie idónea para evaluar el efecto de la altitud sobre la cantidad de biomasa y carbono presentes en árboles forestales. Existen diferentes estudios que han evaluado la cantidad de biomasa y carbono en bosques de *P. hartwegii*, por ejemplo, Colohua-Citlaha (2015) en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Rojas-García (2004) en el Parque Nacional La Malinche, Carrillo-Anzures *et al.* (2016) en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, Sánchez (2011) en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y Moreno-Cano (2010) en Amecameca. Sin embargo, en México hay pocos estudios donde se compare la variación de la producción de biomasa y captura de carbono en distintos pisos altitudinales, por lo que resulta primordial entender ¿cómo son los flujos de carbono en diferentes pisos altitudinales? y conocer su capacidad de almacenamiento a nivel ecosistémico.

Por otra parte, la biomasa es una variable utilizada para generar y desarrollar modelos de predicción de escenarios futuros sobre el comportamiento del carbono en ecosistemas forestales (Martínez-Barrón *et al.*, 2017) y, se agrupa por componente estructural: tronco, ramas, follaje y raíz; por lo que es considerada un elemento esencial para entender los flujos de carbono en los sistemas terrestres (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2015).

Existen dos formas de estimar la biomasa y la cantidad de carbono en árboles, una es a través de métodos directos y la otra en forma indirecta. Los primeros, consisten en muestreos destructivos de pesos verdes y secos de cada componente vegetal; los segundos

utilizan modelos matemáticos generados a partir de variables dasométricas individuales; sin embargo, para poder desarrollar los modelos matemáticos se necesita contar con los datos de biomasa y carbono obtenidos al emplear los métodos directos y de las variables dasométricas de cada árbol (Carrillo-Anzures *et al.*, 2016; Acosta & Carrillo, 2019). Entre los métodos indirectos para estimar la biomasa y la cantidad de carbono aéreo en árboles, destacan los modelos alométricos (Etchevers-Barra *et al.*, 2002; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010). En México, los modelos alométricos se han aplicado para estimar la biomasa y la cantidad de carbono en diferentes especies de pinos, como *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus teocote* Schiede ex Schldl. & Cham., *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldl., *Pinus patula* Schiede ex Schldl. & Cham. *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus cooperi* Blanco, *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus devoniana* Lindley, entre otros, y se ha documentado que pueden almacenar de 67 hasta 227 C Mg ha⁻¹, dependiendo de la especie (Méndez-González *et al.*, 2011; Soriano-Luna *et al.*, 2015; Carrillo-Anzures *et al.*, 2018; Aguirre-Calderón & Jiménez-Pérez, 2011).

En este sentido, la presente investigación busca generar información respecto a la cantidad de biomasa y carbono presente en los estratos aéreos del arbolado adulto y juvenil, distribuidos en tres pisos altitudinales en el bosque de *P. hartwegii* del Parque Nacional Cofre de Perote, a través de la estimación mediante ecuaciones alométricas. Los resultados permitirán incrementar el conocimiento biológico de las especies y abrir vías alternas para su conservación y manejo.

I. ANTECEDENTES

2.1 Bosques templados de coníferas en México y Veracruz

En México, los bosques de coníferas pueden estar constituidos por alguna(s) de las especies de las siguientes familias: Pinaceae (con cuatro géneros y 61 especies), Cupressaceae (con cuatro géneros y 29 especies), Podocarpaceae (con un género y tres especies) y Taxaceae (con un género, una especie). De las 670 especies de coníferas descritas en el mundo, 94 se distribuyen en el país, de las cuales 43 son endémicas. En particular para el género *Pinus*, de las aproximadamente 120 especies que hay en el mundo, 49 están en México y de ellas, 22 son especies endémicas (Gernandt y Pérez-De La Rosa, 2014).

En el estado de Veracruz se reportan 12 especies de pinos (Narave & Taylor, 1997) distribuidas en montañas como el Pico de Orizaba, con especies como *Pinus pseudostrobus* mezclado con *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. y *Abies hickelii* Flous & Gausson, además de bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. (SEMARNAT, 2019); en el Cofre de Perote crecen especies como *Pinus cembroides* Zucc, *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus pseudostrobus*, *Pinus patula*, *Pinus teocote* y *Pinus hartwegii* además de *Abies religiosa* y *Abies hickelii* (CONANP, 2015). En Zacualpan se distribuyen las especies de *Pinus greggii* Englem. y *Pinus patula*, entre otros (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005), al sur del estado se puede encontrar *Pinus oocarpa* (CONANP, 2006).

En México, los pinos tienen gran importancia ecológica, económica y social. Son el componente dominante de la vegetación de las altas montañas, influyen en los procesos funcionales del ecosistema como: ciclos biogeoquímicos, hidrológicos, los regímenes de fuego, y representan el hábitat y fuente de alimento para muchas especies de fauna silvestre. Tienen un alto valor económico, dado que son fuente de madera, leña, pulpa, resinas, semillas comestibles y otros productos. Además, ofrecen servicios ambientales como agua, oxígeno, recreación, la biodiversidad y captura de carbono (Sánchez-González, 2016).

2.2 Captura de carbono en función de la biomasa en bosques templados del mundo y en México

Desde hace varias décadas se ha evaluado el proceso de transformación y el ciclo del C en suelos, rocas, ríos, mares, lagos, comunidades vegetales y seres vivos considerados como los principales sumideros o depósitos de este elemento (SEMARNAT, 2009). En términos

generales, un sumidero de carbono es cualquier depósito natural o artificial de carbono, el cual absorbe este elemento de la atmósfera, contribuyendo así a reducir la cantidad de CO₂ de la misma (FAO, 2013).

La captura de carbono inicia mediante la captación de CO₂ de la atmósfera a través de procesos químicos, físicos, geológicos y/o biológicos. La captación, es llevada a cabo en cuatro etapas: combustión, fotosíntesis, respiración y descomposición (Bashkin & Priputina, 2008), así como en dos fases: la biológica y la geológica (SEMARNAT, 2009). En la primera el carbono se encuentra de manera natural en la atmósfera en forma de bióxido de carbono, siendo su ciclo biológico dominado por la interacción de la fotosíntesis y la descomposición terrestre y marina, estos procesos se encuentran equilibrados y cada uno secuestra alrededor de 2 Gt C al año (Bashkin & Priputina, 2008). En éstos, el carbono regresa a la atmósfera por la respiración y digestión de los animales o por la descomposición de sus desechos y de los restos vegetales, regresando así al punto de partida (SEMARNAT, 2009). En la fase geológica el CO₂ que está libre en la atmósfera puede disolverse en el océano. Ahí se transforma en bicarbonato (HCO₃⁻) y se puede combinar con el calcio (Ca) para formar grandes acumulaciones de roca caliza. El bicarbonato (HCO₃⁻) presente en el agua de la precipitación, por su nivel de acidez, disuelve rocas que contienen calcio (Ca) magnesio (Mg) y silicato (Si), integrándose de esta forma el carbono a la corteza terrestre y constituyendo la mayor reserva de carbono en todo el ciclo (Paul, 2015; SEMARNAT, 2009).

En la atmósfera el carbono existe en dos formas principales, el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), principales gases participantes en la regulación de la temperatura de la tierra e implicados en el efecto invernadero, dado que constituyen filtros de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre (SEMARNAT, 2009). En los océanos y en organismos vivos, el carbono está presente en dos formas principales: como componente de la materia orgánica (en solución y parcialmente en suspensión) y como componente de los iones inorgánicos intercambiables, siendo la cantidad de CO₂ en los océanos 60 veces más que la del aire de la Tierra, lo que sugiere que los océanos podrían absorber la mayor parte del CO₂ adicional que se inyecta actualmente en la atmósfera; sin embargo, los tiempos de intercambio y captura son muy lentos (Bashkin & Priputina, 2008).

Se ha documentado que a nivel global los bosques tropicales pueden contener una biomasa de 190 a 390 Mg ha⁻¹, los bosques templados aproximadamente 270 Mg ha⁻¹, los

bosques boreales 83 Mg ha⁻¹, sabanas y praderas tropicales 57 Mg ha⁻¹, pastizales templados 8 Mg ha⁻¹ y desiertos 7 Mg ha⁻¹; mientras que la cantidad de carbono es cercano al 50% de la biomasa presente en cada ecosistema (Houghton *et al.*, 2009). Aunque la cantidad de carbono capturado en estos ecosistemas puede variar según la composición florística que los conforme y el tipo de suelo presente en ellos (Gorte, 2013). Estos ecosistemas forestales funcionan a través de la interacción entre los ciclos del C, de las sustancias nutritivas y del ciclo hidrológico (Percy *et al.*, 2003).

La permanencia del C en estos ecosistemas depende en gran medida de la tasa de crecimiento de sus poblaciones vegetales. Los bosques jóvenes saludables, pueden retener una gran cantidad de carbono a medida que crecen, por ejemplo, bosques de coníferas al este de Georgia, EUA, contienen 8.74 Tg de biomasa y hasta 4.45 Tg de Carbono (Vachnadze *et al.*, 2016) y en una plantación de *Pinus radiata* D. Do, en Ecuador, registraron un contenido de carbono promedio en biomasa aérea de 14.69 Mg ha⁻¹ (Cargua *et al.*, 2014). En bosques manejados de *P. patula* en Zacualtipán, Hidalgo, con árboles jóvenes de entre 20 y 22 años, se ha documentado que pueden retener hasta 35.05 Mg ha⁻¹ de C (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010). La vegetación de rodales maduros suele almacenar grandes cantidades de carbono, pero se suman a estas existencias de manera paulatina (FAO, 2013). En un estudio con *Quercus benthamii* A. DC., *Q. sapotifolia* Liebm. y *Quercus* sp., en Honduras, se documentó que contenían una biomasa de 232.09 Mg ha⁻¹ y 105.91 Mg ha⁻¹ de carbono (Orellana, 2016); en otros estudios con *Quercus robur* L. en Villacorzo, Chiapas, se reportó valores de la biomasa de 0.79 a 1.12 Mg ha⁻¹ (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2017), en bosques de *Alnus nepalensis* D. Don., en Nepal, documentan que el contenido promedio de carbono es de 34.50 Mg ha⁻¹ (Ranabhat *et al.*, 2009). Para bosques de *Abies religiosa* (Kunth.) Schltdl. et Cham, en México, se reporta un contenido promedio de carbono de 105.75 C Mg ha⁻¹ (Fragoso-López *et al.*, 2017).

Para México, el Reporte Mexicano de Cambio Climático documenta que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector agrícola y forestal tienen un potencial de disminución (o potencial de mitigación) moderado, siendo éste de 100 Mt de CO₂ -eq anuales en 2008 a 87 Mt de CO₂ -eq en 2030 (Gay y Rueda, 2015), entre los cuales las que la vegetación con mayor reserva de carbono son los bosques de coníferas con 106 Mg ha⁻¹ de C (Pompa-García & Sigala-Rodríguez, 2017). Destacando la importancia de este tipo

de vegetación por su mayor acumulación de biomasa en las estructuras de los árboles y por los grandes depósitos de carbono en el suelo (Lal *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2015). Estudios recientes han reportado que, en el país, los bosques tienen una concentración de carbono del 34.99%, superior al de las selvas que es de 31.38%, los matorrales con 15.37% y los pastizales con un 14.65% (Morfín-Ríos *et al.*, 2015).

En México diversos estudios han estimado la biomasa y captura de carbono en especies del género *Pinus* como en *P. patula* (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Soriano-Luna *et al.*, 2015), *P. oocarpa* (Gutiérrez-Vázquez & Flores-Montaño, 2018), *P. duranguensis* Ehren, *P. cooperi* y *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. (Graciano-Ávila *et al.*, 2019), *P. cembroides* Zucc. (Marroquín-Morales *et al.*, 2018; Pompa-García & Yereña-Yamalliel, 2014), *Pinus maximinoi* H.E. Moore (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2017), *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* Lindl. (Méndez-González *et al.*, 2011) y *P. hartwegii* (Sánchez, 2011; Galeana-Pizaña *et al.*, 2013; Carrillo-Anzures *et al.* 2016; Regil-García *et al.*, 2019); la estimación de biomasa de estas especies varía de 0.4 a 198.15 Mg ha⁻¹ y mientras que el carbono de 0.2 a 99.07 Mg ha⁻¹.

Particularmente en *Pinus hartwegii* se estima una cantidad promedio de biomasa de 34.6 Mg ha⁻¹ para la Malinche a una altitud que va de los 3,650 y 3,670 m (Rojas-García, 2004) y un contenido de carbono de 554.20 Mg ha⁻¹ para el Pico de Orizaba a los 3,400 m s.n.m. (Colohua-Citlaha, 2015). En las especies *P. cembroides* (Flores-Ramírez *et al.*, 2012), *P. greggii* (Alba-Landa *et al.*, 2007), *P. patula* (Álvarez, 2008) se reportan las cantidades de carbono de 2.216 Mg ha⁻¹, 4.272 Mg ha⁻¹ y 54.03 Mg ha⁻¹, respectivamente.

2.3 Importancia de las ecuaciones alométricas en la estimación de biomasa y carbono

La alometría estudia las relaciones existentes entre las características dimensionales de los individuos en una población arbórea, arbustiva o herbácea (biomasa, área foliar, etc.), con variables de fácil medición como la altura y el diámetro (Picard *et al.*, 2012), siendo las ecuaciones alométricas un producto del análisis de la correlación entre variables independientes y dependientes, que representan las dimensiones de un individuo vegetal y su biomasa y/o carbono (Gómez-Murillo *et al.*, 2013). Entre las variables dependientes se encuentran la biomasa y carbono (Carrillo-Anzures *et al.*, 2016) y las variables

independientes pueden ser el diámetro normal o a la base, altura total, longitud de copa, peso de ramas, peso del tronco, de hojas y peso total del árbol (Flores-Medina *et al.*, 2018); así como edad de la población (principalmente para las plantaciones), fertilidad del suelo, calidad de estación, prácticas silvícolas, altitud, profundidad de las aguas subterráneas, etc. (Picard *et al.*, 2012). Las ecuaciones alométricas pueden incluir una o más de estas variables, por ejemplo en la estimación de biomasa hay ecuaciones alométricas en las que se incluyen el diámetro normal y la altura total (Soriano-Luna *et al.*, 2015), argumentando que al incluir la altura se minimiza el error del cálculo de biomasa; por otro lado existen ecuaciones en las que se descarta incluir la altura, considerándose únicamente al diámetro normal (Carrillo-Anzures *et al.*, 2016), justificando que no se incluye la altura por lo tardado y difícil que resulta su medición en campo y porque podría generar sobreestimaciones de la biomasa, además de que la altura poco contribuye en la estimación de la biomasa al incluirla en el modelo. A nivel mundial las ecuaciones alométricas se han utilizado para obtener estimaciones de biomasa y con ello el contenido de carbono en árboles, arbustos o pastos (Jenkins *et al.*, 2003; Martínez-Luna *et al.*, 2020). La validez de las ecuaciones alométricas se basa en el hecho de que existe una relación proporcional entre los crecimientos respectivos de cada uno de los componentes de un individuo (fuste, ramas, follaje) con la biomasa, es decir la biomasa de un árbol está relacionada con su crecimiento en diámetro (Picard *et al.*, 2012).

Diversos estudios en el mundo han generado ecuaciones alométricas para estimar biomasa y en consecuencia carbono para diferentes especies arbóreas, por ejemplo, en Etiopía se generaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa en *Olea europaea* L. subsp. *cuspidata* (Kebede & Soromessa, 2018). En Senegal se generaron ecuaciones para estimar biomasa y carbono en *Jatropha curcas* L. (Diédhiou *et al.*, 2017). En China se han utilizado ecuaciones para estimar biomasa en especies de coníferas como *Pinus massoniana* Lamb., y caducas de hoja ancha como *Alniphyllum fortunei* Matsun, *Choerospondias axillaris* (Roxb.) B.L.Burtt & A.W.Hill, *Liquidambar formosana* Hance., y perennes de hoja ancha como *Cyclobalanopsis glauca* Thunb, *Litsea rotundifolia* Hemsley, J. Linn., *Schima superba* Gardner & Champ, (Xiang *et al.*, 2016). En Australia, se generaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies como *Eucalyptus kochii* ssp. *kochii* Maiden & Blakely, *E. kochii* ssp. *borealis* C.A. Gardner, *E. kochii* ssp. *plenissima* C.A. Gardner, *Eucalyptus loxophleba* ssp. *lissophloia* L.A.S. Johnson & K.D. Hill y *Eucalyptus polybractea*

R.T. Baker (Paul *et al.*, 2013). En Canadá se generaron y compararon ecuaciones para estimar biomasa, considerando solamente el diámetro normal y considerando tanto el diámetro normal y la altura total, en *Picea glauca* (Moench) Voss, *Populus balsamifera* L. y *Populus tremuloides* Michx. (Xing *et al.*, 2019).

En México se han reportado 478 ecuaciones alométricas específicas para estimar la biomasa total, el carbono en la biomasa, la biomasa aérea o la biomasa de raíces para 414 especies de árboles, 47 de arbustos, 15 bambúes y dos palmeras, la mayoría de las ecuaciones estimaron la biomasa total, y algunas utilizaron una fórmula aditiva, que sumaba la biomasa estimada por separado de troncos, ramas y hojas u otros componentes. La variable más utilizada en las ecuaciones para estimar la biomasa son el diámetro normal (DN), en 384 ecuaciones y la altura total en 96 ecuaciones (Rojas-García *et al.*, 2015). Por otro lado, es recomendable utilizar ecuaciones específicas para cada especie y sitios, para minimizar una subestimación de biomasa, esto es esencial para cuantificar con precisión la biomasa y por consiguiente la captura de carbono por ésta, considerando variables específicas asociadas a cada especie (Daba & Soromessa, 2019).

Es importante resaltar que evaluar adecuadamente la tasa de crecimiento de los ecosistemas naturales, a través de ecuaciones específicas por ecosistema contribuye a tener estimaciones precisas de biomasa y carbono para cada tipo de ambiente o vegetación (Morfín-Ríos *et al.*, 2015). La ventaja de las ecuaciones alométricas es que son un método muy accesible para cuantificar biomasa y carbono, a través de mediciones de variables como diámetro normal, diámetro basal, copa del árbol y altura total, por lo que resultan ser una herramienta de trabajo sencilla y de fácil interpretación, sobre todo para la conversión y lectura de los datos (Gómez-Murillo *et al.*, 2013). Además, son más factibles dado que una vez generada para un género o especie ya no se hacen muestreos destructivos, además el costo y tiempo necesario para el trabajo no son excesivos (Picard *et al.*, 2012).

2.4 Biomasa y captura de carbono en bosques templados a lo largo de gradientes altitudinales

Un gradiente altitudinal es un cambio gradual en la elevación sobre nivel del mar e implica cambios en elementos climáticos, como la temperatura y la precipitación, lo que trae como consecuencia que la composición y abundancia de especies también cambien o que procesos fisiológicos de las plantas se modifiquen (McVicar y Körner, 2013; Cuyckens *et al.*, 2015).

Por ejemplo, la riqueza de especies en las cimas de las montañas es generalmente menor que la de las tierras bajas, esto se explica por la disminución de la temperatura asociada con el aumento de la elevación y los cambios de topografía (Körner, 2007).

El aumento de la elevación disminuye la temperatura y aumenta la humedad, hecho que influye en el dinamismo de la productividad primaria neta de los ecosistemas (Gao *et al.*, 2019; Eshetu & Hailu, 2020). Actualmente existen estudios donde se ha estimado la biomasa y el contenido de carbono en diferentes pisos altitudinales, por ejemplo, en el bosque de montaña de Gara-Mukitar, Etiopia Oriental, dominado por las especies *Juniperus procera* Hogst. ex Endl., *Maesa lanceolata* Forssk., *Croton macrostachyus* Hochst. ex Delile, *Rhus glutinosa* Hochst. ex A.Rich y *Allophylus abyssinicus* (Hochst.) Radlk., distribuidas sobre un gradiente altitudinal que va de 2,348 a 2,948 m s.n.m., se reportó que el contenido de carbono en la biomasa aérea fue de $102.13 \pm 31.16 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C ha para el piso altitudinal de 2,748-2,950 ms.n.m., y de $214.73 \pm 54.73 \text{ Mg ha}^{-1}$ C ha para el piso altitudinal de 2,548-2,748 m s.n.m., por lo que el contenido de carbono decreció con el aumento de la altitud, lo que se debe a múltiples factores que varían con la altitud, incluidos los factores geomorfológicos, el suelo, la humedad, la nubosidad y la temperatura (Wodajo *et al.*, 2020).

En China se evaluó el contenido de carbono en tres ecosistemas de bosques templados ubicados en diferentes pisos altitudinales. El bosque de *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc. y bosque mixto de hoja ancha ubicados entre los 500-1,100 ms.n.m., bosque de *Picea* y *Abies nephrolepis* (Trautv. ex. Maxim) Maxim., ubicados entre 1,100-1,800 ms.n.m., y bosque de *Betula ermanii* Cham., ubicado entre 1,800-2,000 ms.n.m., en el estrato arbóreo se reporta una captura de C de 179.9 Mg ha^{-1} , 162.5 Mg ha^{-1} y 96.5 Mg ha^{-1} , respectivamente; exhibiendo una tendencia decreciente de la captura de carbono con el aumento de la altitud, debido a que cuando aumenta la altitud, la temperatura disminuye y la precipitación aumenta, lo que afecta la productividad de los bosques (Zhu *et al.*, 2010); en Etiopia se evaluó el C en función de la biomasa aérea en tres altitudes en un bosque templado dominado por *Oliniarochetiana*, *Olea europaea* subsp. *cuspidata*, *Prunus africana*, *Ekebergia capensis*, *Syzygium guineense* subsp. *afromontanum*, *Ficus sur* y *Podocarpus falcatus*, se reporta un contenido de C de $296.89 \pm 34.27 \text{ Mg ha}^{-1}$ para la altitud baja (420-2,279 ms.n.m.), $324.05 \pm 36.68 \text{ Mg ha}^{-1}$ para la altitud media (2,421-2,549 ms.n.m.) y $127.78 \pm 30.81 \text{ Mg ha}^{-1}$ para la mayor elevación (>2550 ms.n.m.), el contenido de C más alto se encontró en la altitud media,

la razón podría estar relacionada con la presencia de una mayor densidad del arbolado en esta altitud (Yohannes *et al.*, 2015).

En el país existen algunos estudios sobre la producción de biomasa y contenido de C en gradientes altitudinales, por ejemplo en la Sierra Norte de Oaxaca, específicamente en Santa Cruz Tepetotutla, se realizó un estudio en bosques montanos de niebla (dominados por especies de *Quercus* y otras latifolidas) a lo largo de un gradiente altitudinal que va de 1,500 a 2,500 m s.n.m., encontrando que en la altitud menor (1,500 ms.n.m.) se registró una biomasa total de 434.48 Mg ha⁻¹, y 151.5 Mg ha⁻¹ de C, en 1,950 ms.n.m. la biomasa total fue de 315.28 Mg ha⁻¹, y 116.1 Mg ha⁻¹ de C, en 2,050 m la biomasa total fue de 305.05 Mg ha⁻¹, y 110.8 Mg ha⁻¹ de C, 2,400 ms.n.m. la biomasa total fue de 294.46 Mg ha⁻¹, y 105.9 Mg ha⁻¹ de C, en 2,500 m la biomasa total fue de 522.92 Mg ha⁻¹, y 207.3 Mg ha⁻¹ de C, es decir que a mayor elevación el carbono iba aumentando y es que las variaciones en los reservorios de carbono en biomasa, estuvieron supeditadas a los cambios en la estructura y composición florística de las comunidades vegetales, así como en los procesos pedogenéticos imperantes dentro del gradiente altitudinal, para la zona de estudio (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013).

En el Parque Nacional Popocatepetl-Iztaccíhuatl se cuantificó el carbono en tres tipos de bosque a lo largo de un gradiente altitudinal (de 3100 a 4000 ms.n.m.): el primer bosque estuvo dominado por *Alnus jorullensis* (con una distribución de 3,100 a 3,200 ms.n.m.), el segundo por *Abies religiosa* (con distribución de 3,500 a 3,700 ms.n.m.) y el tercero por *Pinus hartwegii* (con distribución de 3,700 a 4,000 ms.m.n.), en estos bosques se encontró que la biomasa aérea total de la vegetación fue de 64.3 Mg ha⁻¹, 479.2 Mg ha⁻¹ y 186.2 Mg ha⁻¹, respectivamente; mientras que el contenido de C aéreo fue de 36.5 Mg ha⁻¹, 225.5 Mg ha⁻¹ y 98.1 Mg ha⁻¹, respectivamente; las diferencias entre los bosques se atribuyeron a que las especies dominantes en cada tipo de bosque presentaron diferente tasa de crecimiento (Jasso-Flores *et al.*, 2019).

Por lo anterior la necesidad de las estimaciones precisas de biomasa forestal va en aumento, para poder conocer la productividad forestal y analizar cómo cambia está a través de un gradiente de elevación (Wodajo *et al.*, 2020).

2. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El incremento en la altitud ocasiona cambios en las variables climáticas, como en la temperatura y humedad, lo cual afecta la asignación de recursos para la producción de biomasa y almacenamiento carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl., del Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. En consecuencia, se espera que la biomasa y el contenido de C en el límite altitudinal superior del bosque sean menores a las presentes en el límite altitudinal inferior del bosque.

3. OBJETIVOS

4.1 General

Estimar el almacén actual de biomasa y carbono en la parte aérea correspondiente a árboles adultos y juveniles en tres niveles altitudinales en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional Cofre de Perote (PNCP), Veracruz.

4.2 Específicos

- 4.2.1 Comparar los contenidos de biomasa y carbono en árboles adultos y juveniles de *Pinus hartwegii*, distribuidos en tres pisos altitudinales en el PNCP, Veracruz.
- 4.2.2 Evaluar el patrón de variación de la cantidad de biomasa y carbono en un gradiente altitudinal del bosque de *Pinus hartwegii* en el PNCP, Veracruz.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el PNCP, el cual se ubica en el centro-oeste del estado de Veracruz, en el extremo sur de la Sierra Madre Oriental en confluencia con el Eje Neovolcánico Transversal, forma parte de la sub-provincia fisiográfica denominada Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 2011). El Parque Nacional Cofre de Perote tiene como límites altitudinales las cotas de los 1,200 ms.n.m. y los 4,230 ms.n.m.. Se localiza entre los paralelos 19°24'08" y 19°32'04" de latitud Norte y los meridianos 97°05'07" y 97°12'05" de longitud Oeste (CONANP, 2015).

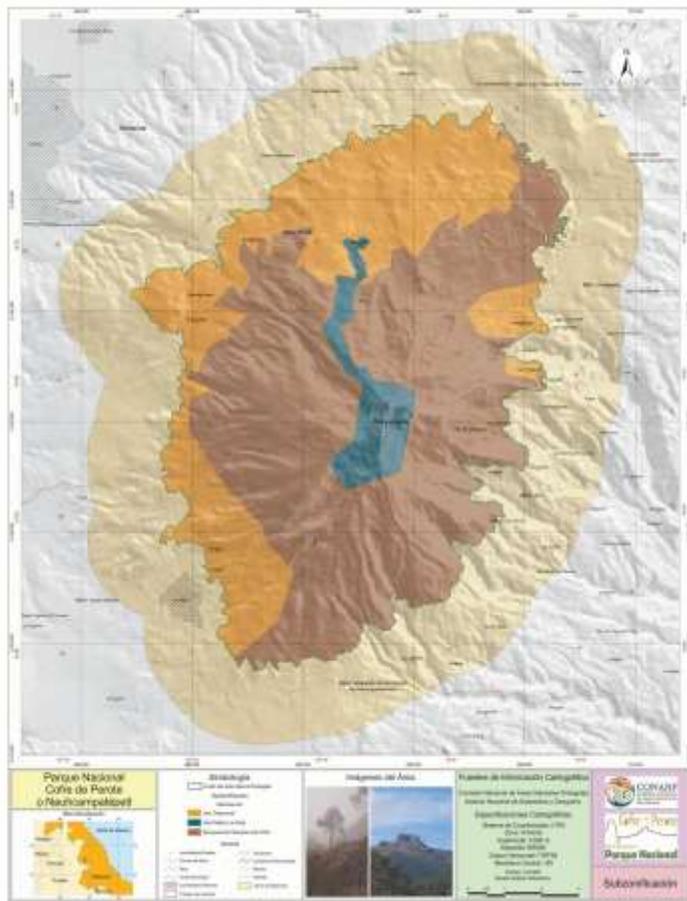


Figura 1. Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz (CONANP, 2015).

5.2Clima

La posición geográfica, el relieve, la altitud y la cercanía del Cofre de Perote o Nauhcampatpetl con el Golfo de México determinan condiciones climáticas muy variadas. La montaña es una barrera geográfica para los vientos cálidos provenientes del Golfo de

México, que al chocar con ella suben rápidamente, se enfrían y se precipitan en forma de neblina o lluvia en la ladera oriental, mientras que, en la ladera occidental, hacia el Valle de Perote, se crea un efecto de sombra orográfica o sombra de montaña, con precipitación escasa, por lo que el paisaje es muy distinto.

En el PNCP se presentan cinco tipos de clima de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1981): Cb'(m)(f): Semifrío, húmedo con verano fresco largo, con temperatura media anual que va de 5° C a 12° C. Cb'(w2): Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, con temperatura media anual entre 5°C y 12°C. C(m)(f): Templado, húmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18° C. C(w2): Templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12° C grados centígrados y 18° C. ETH: Frío subhúmedo, con temperatura media anual entre 5° C y -2°C (CONANP, 2015).

5.3 Vegetación

El Cofre de Perote o Nauhcampatépetl tiene una gran diversidad de flora; se han registrado casi 600 especies, de las cuales 372 se encuentran en el Parque Nacional. En los bosques de coníferas y templadofríos del ANP, y en sus alrededores se encuentran algunas especies en riesgo de acuerdo con los listados de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-Semarnat-2010, Entre las que se encuentran el enebro azul (*Juniperus sabinooides monticola*), la *Gentiana spathacea* y el hongo (*Psilocybe xalapensis*), catalogadas como sujetas a protección especial; en categoría de amenazada el hongo tocomate de moscas (*Amanita muscaria* subsp. *flavivolvat*), y en peligro de extinción el oyamel de Juárez (*Abies hickelii*), esta última especie endémica de México; y la selpanza (*Boletus edulis*) como amenazada. Asimismo, se encuentran los musgos *Anomobryum plicatum*, *Mielichhoferia shiedeana*, *Morinia stenothecca*, *Neosharpiella aztecorum*, endémicos de México y del Cofre de Perote.

Con base en la clasificación de tipos de vegetación de Rzedowski (1978), los tipos de vegetación en el Parque Nacional Cofre de Perote o Nauhcampatépetl corresponden a bosque de coníferas con bosque de *Pinus* y *Abies*, bosque de *Pinus-Quercus*, pastizal alpino (CONANP,2015).

5.4 Suelos

Los suelos del PNCP son de origen volcánico, resultado de la edafogénesis de rocas ígneas extrusivas depositadas durante emisiones volcánicas. Los principales tipos de suelo son: Andosol, suelos jóvenes formados a partir de materiales ricos en vidrios volcánicos recientes

originados de cenizas volcánicas. El andosol ócrico es el tipo de suelo más representativo del Área Natural Protegida, los cuales se caracterizan por su elevada susceptibilidad a la erosión. El andosol húmico se distribuye en áreas de menor extensión dentro del Parque Nacional y presenta una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica, pero por lo general ácida y pobre en nutrientes (horizonte A úmbrico). Regosol eútrico, son suelos que se desarrollan a partir de materiales no consolidados. Se caracterizan por presentar horizontes claros y sueltos poco diferenciados, derivados de cenizas, escorias y arenas gruesas volcánicas recientemente depositadas (CONANP, 2015).

5.5 Muestreo

En tres pisos altitudinales sobre una misma exposición (ladera norte del PNCP), se realizó un muestreo estratificado por conglomerados equivalente al utilizado en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (CONAFOR-SEMARNAT, 2012) (Figura 2). El primer piso (P1) se ubicó en el límite de distribución altitudinal inferior de *P. hartwegii* en el PNCP, a 3,500 m; el segundo piso (P2) se ubicó en la parte media de distribución de la especie, a los 3,800 m y el tercer piso (P3) se ubicó en el límite superior de distribución de la especie, a 4,100 m.

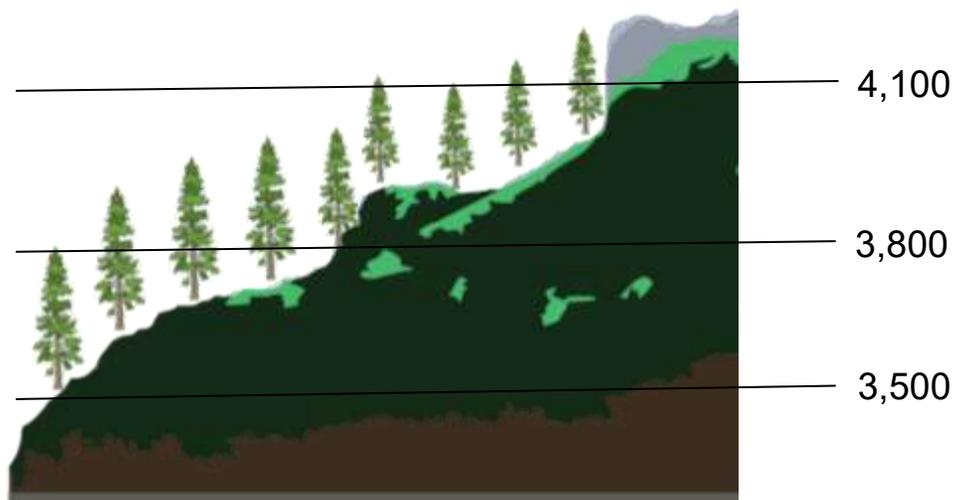


Figura 2. Pisos altitudinales (m s.n.m) donde se establecieron los sitios de muestreo en el Parque Nacional Cofre de Perote.

Todos los pisos altitudinales se ubicaron en un bosque de *Pinus hartwegii*, por lo que fue la especie dominante en todos los pisos altitudinales muestreados, en los pisos altitudinales de los 3,800 y 4,100 m, se ubicaron bosques monoespecíficos de *P. hartwegii*, mientras que en el piso altitudinal de 3,500 m *P. hartwegii* comienza a asociarse con *Abies religiosa*, aunque esta última especie está presente con baja densidad poblacional. En los pisos altitudinales muestreado no se detectaron otras especies arbóreas asociadas a *P. hartwegii*.

En cada piso altitudinal se establecieron tres conglomerados. Cada conglomerado estuvo compuesto por cuatro unidades de muestreo de forma circular cuya forma representa una <<Y>> invertida respecto al norte (Figura 2). La unidad de muestreo número uno se ubica en el centro del conglomerado y las unidades de muestreo 2, 3 y 4 son periféricas. El azimut para localizar los sitios dos, tres y cuatro a partir del centro del sitio uno fue de 00°, 120° y 240°, respectivamente. La distancia del sitio de muestreo uno a cada uno de los sitios restantes fue de 45.14 m. Cada sitio de muestreo del conglomerado (uno, dos, tres y cuatro), tuvo un radio de 11.28 m con una superficie de 400 m² (Figura 2).

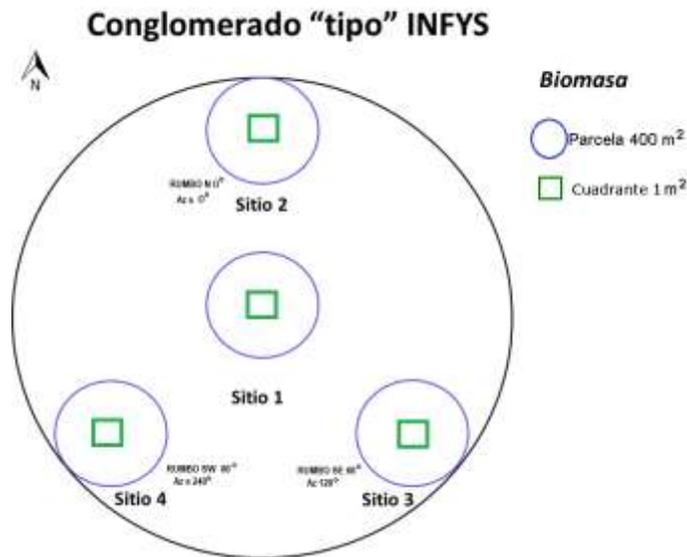


Figura 3. Diseño del conglomerado tipo INFyS con sitios circulares para la recolección de información para la estimación de biomasa y carbono (Tomado de Ángeles-Pérez et al., 2015).

Las variables cuantitativas consideradas en el presente estudio se basaron en el muestro tipo INFyS (Inventario Nacional Forestal y Suelos) de la CONAFOR-SEMARNAT (2012), y son las siguientes: número de árbol, especie (unidad taxonómica), nombre común, diámetro a la base o diámetro normal (DN) (Figura 3). Las variables cualitativas fueron las

siguientes: Altura sobre el nivel del mar, pendiente, exposición, de igual forma se tomaron en cuenta factores cualitativos de perturbación como son: Incendios, plagas, enfermedades, pastoreo y talas clandestinas.

5.6 Medición en campo

Dentro de cada sitio de 400 m², cada árbol se enumeró y se le midió el DN (medido a 1.30 m de altura), en individuos con $DN \geq 7.5$ cm o el diámetro basal en planta con $DN < 7.5$ cm o con una altura ≤ 1.30 m, con una cinta diamétrica (CONAFOR, 2009) (Figura 3 a y b). Las mediciones comenzaron en la orientación norte y siguieron el orden de las manecillas del reloj.

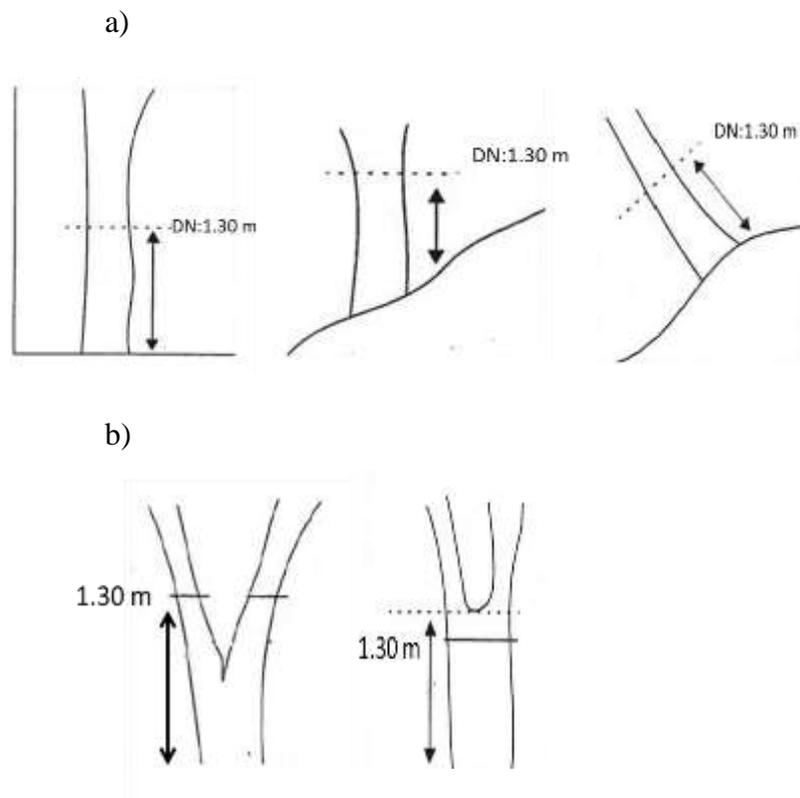


Figura 4. Medición de diámetro normal (DN) en árboles a) en distintas condiciones topográficas y b) con más de un tronco.

5.7 Estimación de biomasa y carbono

Se estimó la biomasa y el contenido de carbono por individuo en cada unidad experimental utilizando una ecuación alométrica disponible para cada una de las especies encontradas, en las que se hace uso del DN o del diámetro a la base (DB), dependiendo del DN. La ecuación alométrica utilizadas para estimar la biomasa en árboles de *P. hartwegii*

con $DN \geq 7.5$ cm fue la ajustada por Carrillo-Anzures *et al.* (2016) y para individuos con $DN < 7.5$ cm o con altura < 1.3 m, la ajustada por Martínez-Luna (2020).

Ecuación para estimar la biomasa en arbolado juvenil con $DN < 7.5$ cm o con altura < 1.3 m:

$$B=0.0092DB^{2.7315}$$

Donde:

B = biomasa total,

DB = diámetro a la base.

Ecuación para estimar la biomasa en arbolado con $DN \geq 7.5$ cm:

$$B= 0.0635DN^{2.4725}$$

Donde:

B = biomasa aérea,

DN = diámetro normal.

El carbono en arbolado juvenil de *P. hartwegii* con $DN < 7.5$ cm o con altura < 1.3 m, se estimó en función de la biomasa calculada, multiplicándola por el factor de 0.48 (Carrillo-Anzures *et al.*, 2016).

La ecuación para estimar carbono en arbolado de *P. hartwegii* con $DN \geq 7.5$ cm fue la siguiente (Carrillo-Anzures *et al.*, 2016):

$$C= 0.0309DN^{2.4722}$$

Donde:

C = contenido de carbono y,

DN = diámetro normal.

En *A. religiosa* se utilizaron las ecuaciones generadas por Avendaño-Hernández *et al* (2009) para estimar biomasa y carbono:

$$B= 0.0713DN^{2.5104}$$

Donde:

B= Biomasa total y,
DN = diámetro normal.

$$C= 0.0332DN^{2.5104}$$

Donde:

C= contenido de carbono y,
DN = diámetro normal.

Una vez obtenidas las mediciones y las estimaciones se extrapolaron en cada sitio de muestreo a una hectárea.

5.8 Análisis estadístico

Como los datos de biomasa y carbono no cumplieron con los principios de normalidad, para evaluar el efecto de la altitud (variable independiente) sobre la cantidad de biomasa y carbono (variables dependientes) se utilizó el modelo lineal generalizado análisis mediante el procedimiento GENMOD del paquete estadístico SAS y la comparación múltiple de medias Tukey (SAS, 2004) para detectar diferencias significativas entre altitudes y conocer el patrón de variación existente. El modelo lineal generalizado amplía el modelo general lineal y permite que la variable dependiente tenga una distribución no normal. El procedimiento GENMOD permite ajustar modelos lineales generalizados con diferentes distribuciones de probabilidad (binomial, Gaussiana, multimodal, geométrica, normal, Poisson, etc.) (Liang & Zeger, 1986).

6. RESULTADOS

6.1 Estimaciones generales de biomasa y carbono en el bosque de *P. hartwegii*

El DN promedio en el bosque de *P. hartwegii* fue de aproximadamente 18 ± 0.702 cm y el diámetro basal de 6 ± 0.339 cm, mientras que la cantidad promedio de biomasa fue de 102.808 ± 12.529 Mg ha⁻¹ y la cantidad de carbono fue de 49.888 ± 6.066 Mg ha⁻¹ (Tabla 1). El arbolado con DN ≥ 7.5 cm en promedio produjo aproximadamente 102 ± 12.588 Mg ha⁻¹ de biomasa y se almacenó 49 ± 6.081 Mg ha⁻¹ de carbono (Tabla 1). Por su parte, el arbolado juvenil (con DN < 7.5 cm) en promedio produjo una biomasa de 0.7 ± 0.138 Mg ha⁻¹ y almacenó 0.3 Mg ha⁻¹ de carbono (Tabla 1).

Tabla 1. Promedios generales y medidas de dispersión de la cantidad de biomasa y carbono del A) bosque de *Pinus hartwegii*, B) del arbolado con DN ≥ 7.5 cm y C) juvenil (DN < 7.5 cm).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Error estándar
A) Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>					
Biomasa (Mg ha⁻¹)	102.808	5.919	221.397	71.974	12.529
Carbono (Mg ha⁻¹)	49.888	2.876	105.770	34.845	6.066
B) Arbolado con DN ≥ 7.5 cm					
DN (cm)	17.979	8.967	29.179	4.033	0.702
Biomasa (Mg ha⁻¹)	101.872	5.634	218.262	72.142	12.558
Carbono (Mg ha⁻¹)	49.438	2.740	104.310	34.932	6.081
C) Arbolado juvenil (con DN < 7.5)					
DB (cm)	6.115	2.250	10.500	1.856	0.339
Biomasa (Mg ha⁻¹)	0.672	0.014	3.135	0.754	0.138
Carbono (Mg ha⁻¹)	0.321	0.007	1.460	0.356	0.065

6.2 Biomasa y carbono por especie

El promedio de biomasa y carbono para el arbolado de *P. hartwegii* fue de 97.794 Mg ha⁻¹ y 47.542 Mg ha⁻¹, respectivamente; mientras que las de *A. religiosa* fueron de 14.111 Mg ha⁻¹ y 6.570 Mg ha⁻¹ (Figura 4 y 5). *Pinus hartwegii* fue la especie que produjo la mayor biomasa.

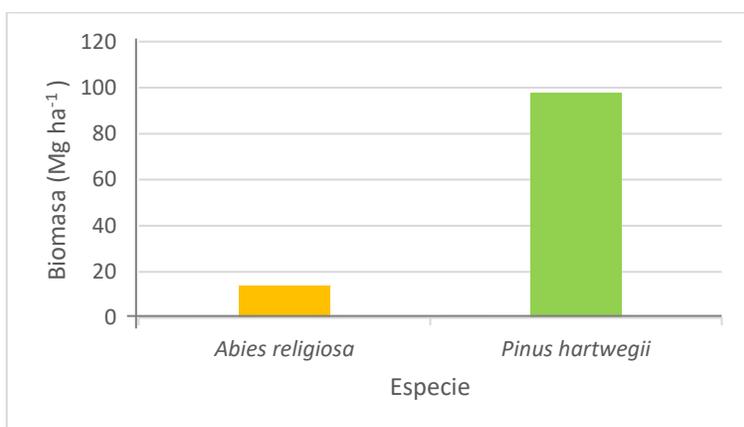


Figura 5. Producción de biomasa en *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* en el Cofre de Perote, Veracruz.

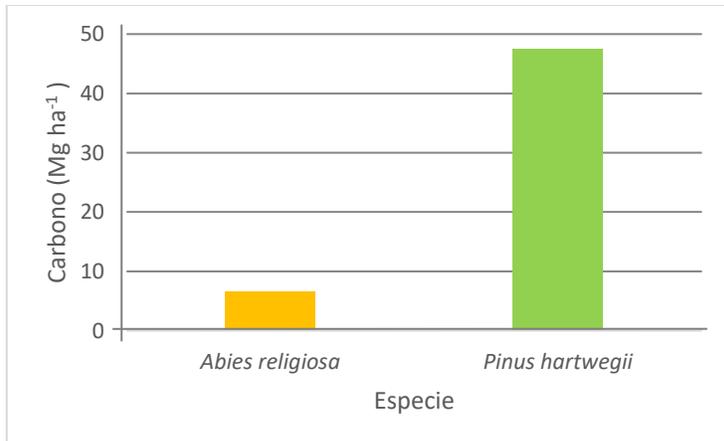


Figura 6. Captura de carbono en *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* en el Cofre de Perote, Veracruz.

6.3 Variación altitudinal de biomasa y contenido de carbono

Existieron diferencias significativas entre pisos altitudinales (< 0.0001) en la producción de biomasa y captura de carbono.

La cantidad de biomasa aérea total promedio por piso altitudinal fue de 171.71, 99.71 y 15.07 Mg ha⁻¹, para los sitios altitudinales de 3,500, 3,800 y 4,100 m s.n.m., respectivamente. El patrón de variación altitudinal de biomasa mostró que los árboles del sitio de menor elevación produjeron una mayor biomasa y los árboles del sitio de mayor elevación produjeron menor biomasa (Figura 6).

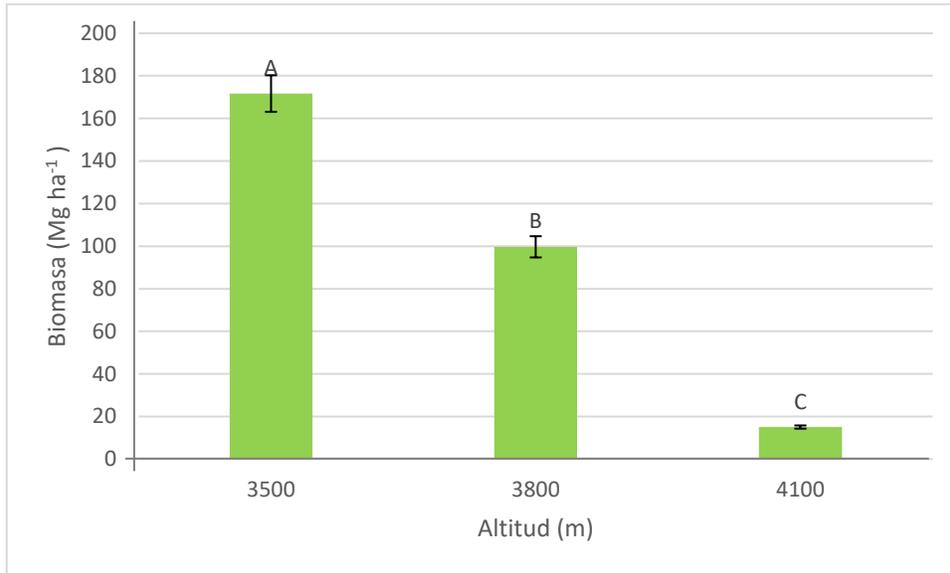


Figura 7. Patrón de variación altitudinal de la producción de biomasa en un bosque de *P. hartwegii* del Cofre de Perote, Veracruz.

El contenido promedio de carbono por piso altitudinal fue de 83.23, 48.46 y 7.32 Mg ha⁻¹, para los sitios altitudinales de 3,500, 3,800 y 4,100 m s.n.m., respectivamente. El patrón de variación altitudinal para el carbono presentó la misma tendencia que en la biomasa, es decir el piso de mayor elevación almacenó menos carbono que los otros sitios de menor elevación (Figura 7).

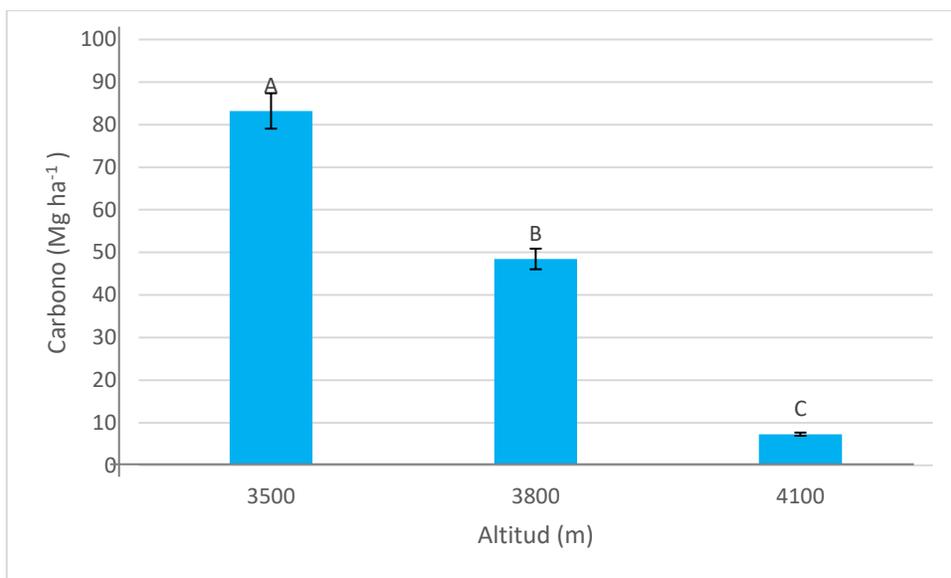


Figura 8. Patrón de variación altitudinal de la producción de biomasa en un bosque de *P. hartwegii* del Cofre de Perote, Veracruz.

7. DISCUSIÓN

7.1 Estimaciones generales de biomasa y carbono

La estimación de biomasa en el bosque de *P. hartwegii* estudiado del PNCP, fue menor a la producida en un bosque de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocateptl (Jasso-Flores *et al.*, 2019); lo que podría deberse a la precipitación anual puesto que cada montaña tiene sus características climáticas particulares (Körner, 2007). Al comparar la cantidad de biomasa del bosque de *P. hartwegii* del PNCP con otros tipos de bosques, resulta que también el bosque de *P. hartwegii* del PNCP tuvo menor cantidad de biomasa, excepto que el bosque de *Alnus jorullensis*, el cual presentó menores cantidades de biomasa (ver tabla 2) (Jasso-Flores *et al.*, 2019). Lo anterior se puede deber a que las especies de estos diferentes bosques (ver tabla 2) presentan una mayor tasa de crecimiento del diámetro (Jasso-Flores *et al.*, 2019), además de mayor densidad del arbolado (Yohannes *et al.*, 2015).

En cuanto al contenido de carbono, en el presente estudio, resultó intermedia a dos estudios previos reportados en bosques de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocateptl (Acosta-Mireles & Carillo-Anzures, 2019; Jasso-Flores *et al.*, 2019). Al mismo tiempo, el carbono, en el presente estudio, fue menor a la reportada en otros tipos de bosque, excepto al bosque de *Alnus jorullensis* (ver tabla 2) (Jasso-Flores *et al.*, 2019).

Tabla 2. Producción de biomasa y captura de carbono en bosques de clima templado frío.

Tipo de bosque	Localidad	Altitud (m s.n.m.)	Biomasa (Mg ha⁻¹)	Carbono (Mg ha⁻¹)	Fuente
<i>Bosque de Pinus hartwegii</i>	PNCP	4,100 3,800 3,500	102.808	49.888	Este estudio
Bosque de <i>P. hartwegii</i>	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	3,770	-	31.974	Martínez Luna (2020)
Bosque de <i>P. hartwegii</i>	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	3,700	186.2	98.1	Jasso-Flores et al. (2019)
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	3,500	479.2	225.5	Jasso-Flores et al. (2019)
Bosque de <i>Alnus jorullensis</i>	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	3,100	64.3	36.5	Jasso-Flores et al. (2019)
Bosque de <i>Abies religiosa</i> y <i>Cupressus lusitánica</i>	Santa Catarina del Monte, San Pablo Ixayoc, Santa María Nativitas y San Miguel Tlaixpan	---	---	92 y 237, respectivamente	Bolaños-González et al. (2017)
Bosque templado, Dgo.	Ejido La Victoria	---	130.28	65.14	Graciano-Ávila et al. (2019)

7.2 Biomasa y carbono por especie

La estimación de la biomasa es indispensable para conocer el contenido de carbono de los bosques (Martínez-Barrón *et al.*, 2017). La cantidad de biomasa y carbono depende de la especie, y de la densidad de individuos en el bosque. En el presente estudio, *Pinus hartwegii* presentó una mayor cantidad de biomasa y por lo tanto una mayor cantidad de C que *Abies religiosa*, esto se debe a que *P. hartwegii* fue la especie dominante en todo el bosque, *A. religiosa* solo estuvo presente en el piso altitudinal más bajo (3,500 m s.n.m.). En otros estudios en donde *A. religiosa* es la especie dominante se reporta una biomasa que va de 237 a 638.86 Mg ha⁻¹ (Bolaños *et al.*, 2017; Regil-García, 2019); mientras que los valores de C para la especie van de 62.07 a 297.33 Mg ha⁻¹ (ver tabla 3) (Razo-Zarate *et al.*, 2013; García-Cepeda, 2016; Rojas-Barrera, 2019; Hernández-Moreno, 2020). Mientras que para *P. hartwegii* los valores de C van de 82.51 a 554.20 Mg ha⁻¹ (ver tabla 3) (Colohua-Citlaha, 2015; García-Regil, 2020, Vega-Chávez, 2021).

Tabla 3. Biomasa y carbono en *A. religiosa* y algunas especies de pino.

Especie	Biomasa (Mg ha⁻¹)	Carbono (Mg ha⁻¹)	Fuente
<i>Pinus hartwegii</i>	111.906	54.112	Este estudio
<i>Abies religiosa</i>	14.111	6.570	
<i>Pinus hartwegii</i>	-	82.51	Vega-Chávez (2021)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	323.23	155.03	Hernández- Moreno (2020)
<i>Abies religiosa</i>	638.86	287.49	García-Regil (2020)
<i>Pinus hartwegii</i>	209.15	94.12	
<i>P. durangensis,</i>	130.28	65.14	Graciano-Ávila et <i>al.</i> (2019)
<i>Abies religiosa</i>	-	62.07	Rojas-Barrera (2019)

<i>Abies religiosa</i>	237	-	Bolaños <i>et al.</i>
<i>Cupressus lusitanica</i>	73	-	(2017)
<i>Abies religiosa</i>	-	91.22	García-Cepeda <i>et al.</i>
			(2016)
<i>Pinus hartwegii</i>	-	554.20	Colohua-Citlahua
			(2015)
<i>Abies religiosa</i>	-	297.33	Razo-Zarate <i>et al.</i>
			(2013)

7.3 Influencia de la altitud en la cantidad de biomasa y carbono

El patrón de variación altitudinal de la biomasa y carbono encontrado en el bosque de *P. hartwegii* distribuido en tres pisos altitudinales en el Parque Nacional Cofre de Perote, indicó que los árboles que crecen en los conglomerados de menor altitud presentaron mayor cantidad biomasa y carbono; los árboles ubicados en los conglomerados de altitud intermedia presentaron valores intermedios y finalmente, los árboles de los conglomerados de mayor elevación presentaron los menores valores. Lo anterior coincide con la mayoría de los estudios que se han realizado en gradientes altitudinales. Por ejemplo, en el bosque de montaña de Gara-Mukitar, Etiopia Oriental, dominado por las especies de *Juniperus procera*, *Maesa lanceolata*, *Croton macrostachyus*, *Rhus glutinosa* y *Allophylus abyssinicus*, se reportó que la cantidad de carbono decreció con el aumento de la altitud (Wodajo *et al.*, 2020); de manera similar, en China se evaluó la cantidad de carbono en tres bosques templados ubicados en diferentes pisos altitudinales, bosque de *Pinus koraiensis* - bosque mixto de hoja ancha ubicados entre los 500-1,100 ms.n.m., bosque de *Picea* y *Abies nephrolepis* ubicados entre 1,100-1,800 ms.n.m., y bosque de *Betula ermanii* ubicado entre 1,800-2,000 ms.n.m., en los que se encontró una tendencia decreciente de la cantidad de carbono con el aumento de la altitud (Zhu *et al.*, 2010).

En el presente estudio, el sitio ubicado a una menor altitud fue el que presentó los mayores valores en el DN promedio (18.7 cm), en contraste con las altitudes de 4,100 ms.n.m. y 3,800 ms.n.m., las cuales registraron una dimensión de 13.5 cm y 11.7 cm, respectivamente.

Además, es importante señalar que el sitio de mayor densidad de arbolado fue el de 3,800 ms.n.m., mientras que el sitio con densidad de arbolado intermedia fue el de 3,500 ms.n.m., y los conglomerados con menor densidad, fueron los ubicados en el piso altitudinal de los 4,100 ms.n.m.,. Esto debido a que el incremento en la elevación sobre el nivel mar influye sobre las variables climáticas como la temperatura y humedad, lo cual afecta la asignación de recursos para la producción de biomasa y captura de carbono en el bosque (Gao *et al.*, 2019; Eshetu y Hailu, 2020; Zhu *et al.*, 2010).

Sin embargo, el patrón de variación de la cantidad de biomasa y carbono resultó distinto a lo reportado por Jasso-Flores *et al.* (2019), quienes cuantificaron la biomasa y el carbono en tres bosques distribuidos a lo largo de un gradiente altitudinal (de 3100 a 4000 m) en el parque Nacional Popocatepetl-Iztaccihuatl: el primer bosque estuvo dominado por *Alnus jorullensis* (con una distribución de 3,100 a 3,200 m.s.n.m.), el segundo por *Abies religiosa* (con distribución de 3,500 a 3,700 m.s.n.m.) y el tercero por *Pinus hartwegii* (con distribución de 3,700 a 4,000 m.s.m.n), en estos bosques se encontró que los valores mayores de biomasa aérea total y de carbono se dio en el bosque de *A. religiosa* (bosque con elevaciones intermedias); seguido por el bosque de *P. hartwegii* (bosque con las elevaciones intermedias) y finalmente por bosque de *A. jorullensis* (bosque con las menores elevaciones); aunque cabe la mención que este estudio no fue diseñado exclusivamente para el bosque de *P. hartwegii* y por lo tanto abarca una mayor amplitud de altitudes, además el bosque de *P. hartwegii* no se muestreo en rangos altitudinales.

8. CONCLUSIONES

La cantidad de biomasa y carbono, variaron según la altitud de cada zona, la cual influyó de manera directa en la densidad del arbolado y en las dimensiones del diámetro normal. El patrón de variación altitudinal de la producción de biomasa y captura de carbono indicó que a medida que la elevación de los sitios muestreados aumentó, la producción de biomasa y la captura de carbono disminuyeron; por lo que los resultados encontrados concordaron con la hipótesis planteada. Finalmente, la producción de biomasa y captura de carbono fue mayor en *P. hartwegii* que en *A. religiosa* debido a que *P. hartwegii* fue la especie dominante del bosque.

9. REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., & Carrillo-Anzures, F. (2019). *Determinación de carbono que han almacenado las reforestaciones realizadas por la empresa automotriz Volkswagen de México, sus Proveedores y Concesiones Integrales en 750 hectáreas en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. Informe Técnico. INIFAP. Campo Experimental Valle de México. Coatlinchan, Texcoco, Estado de México. 53 p.
- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A. & Etchevers-Barra, J. D., (2002). *Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies de arbóreas en Oaxaca, México*. *Agrociencia* 36(6): 725–736.
- Aguirre-Calderón, O. A. & Jiménez-Pérez, J. (2011). *Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6), 73-84.
- Alba-Landa, J., Mendizábal-Hernández, L. del C. & Méndez-Méndez, C. (2007) *Potencialidad diferencial de captura de carbono de una plantación de Pinus greggii Engelm. En Naolinco, Veracruz, México*. *Foresta Veracruzana* 9(2), 57-60.
- Álvarez-Arteaga, G., García Calderón, N. E., Krasilnikov, P.I, & García-Oliva, F. (2013). *Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México*. *Agrociencia* 47(2), 171-180.
- Ángeles-Pérez G., B. Méndez L., R. Valdez L., F.O. Plascencia E., H. de los Santos P., G. Chávez A., A.D. Ortiz R., M. de los A. Soriano L., Z. Zaragoza C., E. Ventura P. & A. Martínez L. 2015. *Estudio de caso del sitio de monitoreo intensivo de carbono en Hidalgo*. Reporte Técnico. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 106 p.
- Avendaño-Hernández, D.M., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F. & Etchevers-Barra, J.D. (2009). *Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233-238. Recuperado en 11 de enero de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011&lng=es&tlng=es.

- Bashkin, V. N., & Pripulina, I. V. (2008). *Carbon Cycle*. Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00595-4>
- Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M.A., Paz-Pellat, F. & Ponce-Pulido, J.I.. (2017). *Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México*. Terra Latinoamericana, 35(1), 73-86.
- Cargua, F. E., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., & Vinueza, L. M. (2014). *Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (Pinus radiata) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador*. Información Tecnológica 25(3), 83-92.
- Carrillo-Anzúres, F., Acosta-Mireles, M., Flores-Ayala, E., Juárez-Bravo, J. E., & Bonilla-Padilla, E. (2018). *Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5(5), 779-793.
- Carrillo-Anzures F., M. Acosta-Mireles, C. del R. Jiménez-Cruz, L. González-Molina & J. D. Etchevers-Barra. (2016). *Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de Pinus hartwegii en el Parque Nacional Ixta-Popo, México*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 7(3): 681-691.
- Challenger, A., & Soberón, J. (2008). *Los ecosistemas terrestres. En Capital Natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. Capital Natural de México.
- Colohua-Citlahua, B. (2015). *Estimación de captura de carbono por la especie Pinus hartwegii Lindl., en la vertiente nororiental del Parque Nacional Pico de Orizaba*. Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Orizaba, Veracruz. 118 p.
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. (2009). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México*. Zapopan, Jalisco, México. 22 p.
- CONAFOR-SEMARNAT [Comisión Nacional Forestal-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. (2012). *Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2012*. SEMARNAT. México. 140 p.

- CONANP [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas]. (2006). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera de los Tuxtlas*. 299.
- CONANP [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas]. (2015). *Programa de Manejo del Parque Nacional Cofre de Perote*. Documento entregado para su consulta pública. México. 139 p.
- Cuyckens, G. A. E., Malizia, L. R., & Blundo, C. (2015). *Composición, diversidad y estructura de comunidades de árboles en un gradiente altitudinal de selvas subtropicales de montaña (Serranías de Zapla, Jujuy, Argentina)*. *Madera y Bosques* 21(3), 137-148. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.213463>
- Daba D. E. & Soromessa T. (2019). *Allometric equations for aboveground biomass estimation of Diospyros abyssinica (Hiern) F. White tree species*. *Ecosystem Health and Sustainability* 5(1), 86-97, DOI: 10.1080/20964129.2019.1591169
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). *Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Pinus patula Schl. et Cham.* *Madera y Bosques* 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>.
- Diédhiou, I., Diallo, D., Mbengue, A., Hernandez, R. R., Bayala, R., Diéme, R., Diédhiou, P. M., & Sène, A. (2017). *Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of Jatropha curcas L. in Senegal's Peanut Basin*. *Global Ecology and Conservation* 9, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.11.007>
- Eshetu, E. Y., & Hailu, T. A. (2020). *Carbon sequestration and elevational gradient: The case of Yegof mountain natural vegetation in North East, Ethiopia, implications for sustainable management*. *Cogent Food & Agriculture* 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1733331>
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura]. (2013). *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. En Estudio FAO Montes. <https://doi.org/1014-2886>

- Figuroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H.M. (2010). *Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de Pinus patula Schltl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 1(1), 105-112.
- Flores-Ramírez, N. F., Mendizábal-Hernández, L. del C., Alba-Landa, J. (2012). *Potencial de captura y almacenamiento de CO₂ en el valle de Perote. Estudio de caso: Pinus cembroides subsp. orizabensis D.K. Bailey*. Foresta Veracruzana, 14(1), 17-22.
- Flores-Medina, F., Vega-Nieva, D. J., Corral-Rivas, J. J., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., López-Sánchez, C. A., & Carillo Parra, A. (2018). *Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 9(46), 157-185. <https://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>
- Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., González-Ramírez, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Cortés-Blobaum, H. J., & Razo-Zárate, R. (2017). *Carbon sequestration in protected areas: A case study of an Abies religiosa (H.B.K.) Schlecht. et Cham Forest*. Forests 8(11), 429. <https://doi.org/10.3390/f8110429>
- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., & Corona-Romero, N. (2013). *Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México*. Madera y Bosques 19(1), 53-69.
- Gao, M., Piao, S., Chen, A., Yang, H., Liu, Q., Fu, Y. H., & Janssens, I. A. (2019). *Divergent changes in the elevational gradient of vegetation activities over the last 30 years*. Nature Communications 10: 2970. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11035-w>
- García-Cepeda, I. X., Almeida-Leñero., Ávila-Akerberg, V. (2016). *Estimación del almacenamiento de carbono y la percepción social de los servicios ecosistémicos que brinda el bosque de Abies religiosa de la cuenca presa Guadalupe, Estado de México*. Teoría y Praxis, 19, 65-93.
- Regil-García, H., Franco-Maass, S., Endara-Agramont, A., Flamenco-Sandoval, A., Espinoza-Maya, A., Calderón-Contreras, R., & Pérez-Vega, B. (2019). *Procesos de pérdida y recuperación del contenido de carbono en biomasa aérea en las zonas*

- forestales del área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo 2000-2013. *Revista Geográfica De América Central*, 1(64), 203 - 233. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.8>
- Gay y G., C. y Rueda A., J. C. (2015) Reporte mexicano del cambio climático. Grupo III Emisiones y mitigación de gases y efecto invernadero. México: UNAM. 336 p
- Gernandt, D. S., & Pérez-De La Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85 (SUPPL.), 126–133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Gómez-Murillo, L.P.; Villanueva-Uribe, F. A. & Flores-Garnica, J. G. (2013). *Ecuaciones alométricas para estimar peso seco de combustibles forestales vivos en Tlaxcala y Jalisco*. Núm. 2. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 80 p.
- Gorte, R. W. (2013). *Carbon sequestration in forests*. En Carbon Considerations: Biochar, Biomass, Biopower, and Sequestration. ISBN: 9781626184350.
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2019). *Estimation of volume, biomass and carbon content in a forest of temperate-cold climate of Durango, Mexico*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(2), 119–127. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119-127>
- Gutiérrez, E. & Trejo, I. (2014). *Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México*. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(1), 179-188. <https://dx.doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Gutiérrez-Vázquez, B. N. & Flores-Montaña, A. (2018). *Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de Pinus oocarpa Schl. et Cham. en Chiapas, México*. *Foresta Veracruzana* 20(2), 21-28.
- Hernández-Moreno, J. A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Gil Vera-Castillo, J. A. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la

Biosfera Mariposa Monarca. Madera y Bosques, 26(1), e2611802. doi: 1021829/myb.2020.2611802

Houghton, R. A., Hall, F., & Goetz, S. J. (2009). *Importance of biomass in the global carbon cycle*. Journal of Geophysical Research 114, G003E03. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>

Iglesias, L., Tivo, Y. & Casas, J. L. (2006). *Pinus hartwegii Lindl. del Cofre de Perote en Veracruz, México*. Cuadernos de Biodiversidad 20, 10-16. 10.14198/cdbio.2006.20.03.

INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2011). *Estadísticas a propósito del día mundial de las montañas*. Aguascalientes, México. 12 p.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. (2014). Cambio climático (2014). *Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Ginebra, Suiza. 157 págs.

Jasso-Flores, I., Galicia, L., García-Oliva, F., & Martínez-Yrizar, A. (2019). *Are vegetation–soil systems drivers of ecosystem carbon contents along an elevational gradient in a highland temperate forest?*. Canadian Journal of Forest Research 49(3), 296-304. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0245>

Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Birdsey, R. A. (2003). *National-scale biomass estimators for United States tree species*. Forest Science 49(1), 12-35. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.12>

Kebede, B., & Soromessa, T. (2018). *Allometric equations for aboveground biomass estimation of Olea europaea L. subsp. cuspidata in Mana Angetu Forest*. Ecosystem Health and Sustainability 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1433951>

Körner, C. (2007). *The use of ‘altitude’ in ecological research*. Trends in Ecology & Evolution 22, 569-74. 10.1016/j.tree.2007.09.006.

Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R. F., Schneider, B. U., & Von Braun, J. (2012). *Recarbonization*

of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle, C, 1–559.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4159-1>

Liang, K.Y. & Zeger, Z. (1986). Longitudinal data analysis using generalized linear models. *Biometrika*, 73, 13-22.

Marroquín-Morales, P., Méndez-González, J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., & Yerena-Yamallel, J. I. (2018). *Estimación de biomasa aérea en Pinus cembroides Zucc. y Pinus halepensis Mill. en Saltillo, Coahuila*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 94-110. <https://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.172>

Martínez-Barrón, R.A., O.A. Aguirre-Calderón, B. Vargas-Larreta, J. Jiménez-Pérez, E.J. Treviño-Garza & J.I. Yamallel. (2017). *Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(35): 91-105.

Martínez, J. y Fernández-Bremauntz, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología. 523 p.

Martinez-Luna, J. E., Carrillo-Anzures, F., Acosta-Mireles, M., Romero Sánchez, M. E., & Perez-Miranda, R. (2020). Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.726>

McVicar, T. R., & Körner, C. (2013). *On the use of elevation, altitude, and height in the ecological and climatological literature*. *Oecologia* 171, 335-337. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2416-7>

Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2011). *Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de Pinus devoniana Lindl. y P. pseudostrobus Lindl., En Guanajuato, México*. *Agrociencia* 45, 479-491.

Montealegre-Gracia, A. L., Lamelas-Gracia, M. T., De la Riva-Fernandez, J., Garcia-Martin, A., & Escribano-Bernal, F. (2015). *Cartografía de la biomasa aérea total en masas de Pinus halepensis Mill. en el entorno de Zaragoza mediante datos LiDAR-PNOA y*

trabajo de campo. Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación. Universidad de Zaragoza-AGE. ISBN: 978-84-92522-95-8.

Moreno-Cano, M. V. (2010). *Estimación de Carbono en Bosques de P. hartwegii Lindl., en la zona de Amecameca, Estado de México.* Universidad Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. 42 p.

Morfín-Ríos, J. E., Michel-Fuentes, J. M., González-Murguía, R., Carrillo, O., Mayorga, R., Rangel, L., Orozco Orozco, J., Rodríguez Alcaraz, G., & Guerrero Pacheco, G. (2015). *Carbon reserves estimation in forest biomass in Mexico.* Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México.

Narave-Flores, H. & Taylor. K. (1997). *Pinaceae.* Flora de Veracruz. Instituto de Ecología. A. C. Xalapa. Veracruz, México. ISBN 968-7863-02-1 .
<https://doi.org/10.2307/j.ctt20p56d7.46>

Orellana, L. I. M. (2016). *Estimación de Carbono Forestal para Quercus sp. en parcelas permanentes de monitoreo en Reserva Biológica Uyuca.* Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 27 p.

Paul, E. A. (2015). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry.* Fourth Edition. Academic Press, Pages 339-382, ISBN 9780124159556, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00012-8>.

Paul, K. I., Roxburgh, S. H., Ritson, P., Brooksbank, K., England, J. R., Larmour, J. S., John Raison, R., Peck, A., Wildy, D. T., Sudmeyer, R. A., Giles, R., Carter, J., Bennett, R., Mendham, D. S., Huxtable, D., & Bartle, J. R. (2013). *Testing allometric equations for prediction of above-ground biomass of mallee eucalypts in southern Australia.* Forest Ecology and Management 310, 1005-1015. <https://doi.org/10.1016/j.for.eco.2013.09.040>

Percy, K., Jandl, R., Hall, J., & Lavigne, M. (2003). *El papel de los bosques en el ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono.* Boletín No 1. Los bosques y el ciclo de carbono a nivel mundial: fuentes y sumideros. http://iufro-archive.boku.ac.at/iufro/taskforce/tfcs/issue1_march31_Spanisch.pdf

- Picard, N., Saint-André L., Henry M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier. 223 p.
- Pompa-García, M., & Sigala-Rodríguez, J. Á. (2017). *Variación de captura de carbono de especies forestales en México: Una revisión*. *Madera y Bosques* 23(2), 225–235. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321512>
- Pompa-García, M., & Yereña-Yamalliel, J. I. (2014). *Concentración de carbono en Pinus cembroides Zucc: Fuente potencial de mitigación del calentamiento global*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20, 169-175. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.04.014>
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). *Distribución y conservación de las poblaciones naturales de Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana* 72, 1-16.
- Ranabhat, S., Awasthi, K., & Malla, R. (2009). *Carbon sequestration potential of Alnus nepalensis in the mid hill of Nepal: A case study from Kaski district*. *Banko Janakari* 18(2), 3-9. <https://doi.org/10.3126/banko.v18i2.2167>
- Regil-García, H. H., Franco-Maass, S., Endara-Agramont, A. R., Flamenco-Sandoval, A. F., Espinoza-Maya, A., Calderón-Contreras, R., & Pérez-Vega, B. A. (2019). *Procesos de pérdida y recuperación del contenido de carbono en biomasa aérea en las zonas forestales del área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo 2000-2013*. *Revista Geográfica de América Central* 64(1), 203-233. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.8>
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). *Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo, México*. *Madera y Bosques*, 19(2), 73-86.

- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M. D., Seneviratne, S. I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D. C., Papale, D., Rammig, A., Smith, P., Thonicke, K., Van Der Velde, M., Vicca, S., Walz, A., & Wattenbach, M. (2013). *Climate extremes and the carbon cycle*. En *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature12350>
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos-Saldaña, R. A. (2017). *Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37), 77-94. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño- Garza & R. Razo Z. (2009). *Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México*. *Ra Ximhai* 5(3), 317-327.
- Rojas-Barrera J. (2019). *Almacenamiento de carbono aéreo y del suelo del bosque de oyamel del Parque Nacional “El Chico”, Estado de Hidalgo*. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana. 63 p. Recuperada de: https://www.uv.mx/pozarica/mca/files/2019/05/G06_JANET-ROJAS-BARRERA.pdf
- Rojas-García, F. (2004). *Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de Pinus hartwegii del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., 68 p.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). *Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests*. *Annals of Forest Science* 72, 835-864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Sánchez-González, A. (2016). *Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México*. *Madera y Bosques* 14(1), 107-120. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Sánchez, I. E. G. (2011). *Estimación del contenido y captura potencial de carbono 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. Universidad Autónoma de México.

p. 74.

SAS Institute Inc. (2004). SAS/STAT 9.1 User's Guide. North Carolina, USA. SAS Institute Inc. Cary.

SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. (2009). *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*. México.

SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. (2019). *Programa de Manejo Parque Nacional El Pico de Orizaba*. 53(9), 1689–1699.

Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., McDowell, R., Griffiths, R. I., Asakawa, S., Bustamante, M., House, J. I., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P. C., Gerber, J. S., Clark, J. M., Adhya, T., Scholes, R. J. and Scholes, M. C. (2015). *Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils*. Soil Discussions 2 (1), 537-586. ISSN 2199-3998.

Soriano-Luna, M. de los Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). *Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México*. *Agrociencia*, 49(4) 423-438.

Vachnadze, G. S., Tiginashvili, Z. T., Tsereteli, G. V., Aptsiauri, B. N., & Nishnianidze, Q. G. (2016). *Carbon stock sequestered from the atmosphere by coniferous forests of Eastern Georgia in conditions of global warming*. *Annals of Agrarian Science* 14(2), 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.014>

Vega-Chávez L. (2021). *Almacén de carbono y percepción social de las Contribuciones del bosque de Pinus hartwegii en el Municipio de Isidro Fabela, Estado de México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. 50 p. Recuperada de: http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109920/TESIS%20Vega_Cha%cc%81vez_Lizabeth_Final_sin%20agrad.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Wodajo, A., Mohammed, M., & Tesfaye, M. A. (2020). *Carbon stock variation along altitudinal and slope gradients in gara – muktar forest , west hararghe zone , Eastern Ethiopia*. *Forestry Research and Engineering: International Journal* 4(1), 17-26. <https://doi.org/10.15406/freij.2020.04.00095>

- Xiang, W., Zhou, J., Ouyang, S., Zhang, S., Lei, P., Li, J., Deng, X., Fang, X., & Forrester, D. I. (2016). *Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China*. *European Journal of Forest Research* 135, 963-979. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0987-2>
- Xing, D., Bergeron, J. A. C., Solarik, K. A., Tomm, B., Macdonald, S. E., Spence, J. R., & He, F. (2019). *Challenges in estimating forest biomass: Use of allometric equations for three boreal tree species*. *Canadian Journal of Forest Research* 49, 1613-1622. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0258>
- Yohannes, H. (2015). *Carbon Stock Analysis Along Altitudinal Gradient in Gedo Forest: Implications for Forest Management and Climate Change Mitigation*. *American Journal of Environmental Protection*, 4, 237. 10.11648/j.ajep.20150405.14.
- Zhu, B., Wang, X., Fang, J., Piao, S., Shen, H., Zhao, S., & Peng, C. (2010). *Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China*. *Journal of Plant Research* 123, 439-452. <https://doi.org/10.1007/s10265-009-0301-1>

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

www.uv.mx