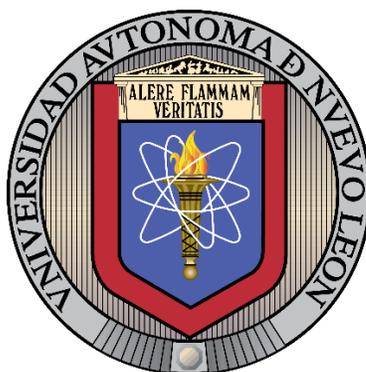


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN  
GRADIENTE ALTITUDINAL EN EL NORESTE DE MÉXICO**

**POR:**

**ING. EMILIO ANTONIO AGUILAR CUMPLIDO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**AGOSTO, 2022**

# ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN EL NORESTE DE MÉXICO

Aprobación de Tesis



---

Dr. José Israel Yereña Yamalle

Director de Tesis



---

Dr. Javier Jiménez Pérez

Asesor de Tesis



---

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Asesor de Tesis

AGOSTO, 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a dios por haberme brindado la oportunidad de tener una extraordinaria familia y poder realizar mis sueños y metas con ellos, por cuidarme y guiarme en el camino correcto en la que voy y darme las fuerzas necesarias de levantarme y seguir luchando en la vida

Agradezco al Doctor Marín Pompa García por haberme brindado su ayuda en licenciatura y haberme recomendado seguir preparándome académicamente

De igual manera agradezco al Doctor Israel Yerena Yamallel, por apoyar con su conocimiento para llevar a cabo este proyecto para poder finalizar mis estudios de maestría

Un agradecimiento enorme a la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ciencias Forestales y a sus docentes por haberme permitido realizar mis estudios académicos en sus aulas y facilitarme la información requerida durante mi estancia en ese lugar

## **Dedicatoria**

Dedico con todo mi corazón esta tesis a mi madre Florencia Cumplido Aguilar, que sin ella no hubiera sido capaz de llegar hasta donde me encuentro ahora, con su confianza, con su experiencia y recomendaciones que ella me ha inculcado ella es mi motor para seguir avanzando

A mis hermanos Nayeli Esmeralda Cumplido Muñoz, Alvaro Cumplido Aguilar y Carlos Eduardo Aguilar Cumplido que siempre están conmigo en las buenas y en las malas escuchando mis experiencias y mis quejas por comprenderme cuando no estaba de humor o por compartir mis alegrías y buenos momentos durante este periodo

A mi esposa e hijos por haberme dado a conocer el verdadero amor que existe en este mundo

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	3
HIPÓTESIS .....	23
OBJETIVOS .....	23
Objetivo general .....	23
Objetivos específicos .....	23
MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
Área de estudio .....	23
Metodología .....	23
RESULTADOS .....	28
DISCUSIÓN .....	38
CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA .....	42

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Emisiones y captura media anual de CO <sub>2</sub> a nivel global, 1989 a 1998.....	12
<b>Tabla 2.</b> Carbono almacenado en ecosistemas terrestres de México (tCha <sup>-1</sup> ).....	12
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones para determinar los parámetros ecológicos.....	25
<b>Tabla 4.</b> Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa aérea.....	26
<b>Tabla 5.</b> Concentración de carbono por especie.....	27
<b>Tabla 6.</b> Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2700-2800 msnm.....	30
<b>Tabla 7.</b> Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2800-2900 msnm.....	31
<b>Tabla 8.</b> Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2900-3000 msnm.....	32
<b>Tabla 9.</b> Biomasa y contenido de carbono por especie del rango altitudinal 2700-2800 msnm.....	33
<b>Tabla 10.</b> Biomasa y contenido de carbono por especie en el rango altitudinal 2800-2900 msnm.....	33
<b>Tabla 11.</b> Biomasa y contenido de carbono por especie 2900-3000 msnm.....	34
<b>Tabla 12.</b> Biomasa y contenido de carbono por rango altitudinal.....	37

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de los sitios de muestreo. ....	24
<b>Figura 2.</b> Número de individuos por categoría diamétrica en el rango altitudinal 2700-2800 msnm. ....	28
<b>Figura 3.</b> Número de individuos por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2800-2900 msnm. ....	29
<b>Figura 4.</b> Número de individuos por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2900-3000 msnm. ....	29
<b>Figura 5.</b> Biomasa y contenido de carbono por categoría dimétrica en el rango altitudinal 2700-2800 msnm. ....	35
<b>Figura 6.</b> Biomasa y contenido de carbono por categoría dimétrica en el rango altitudinal 2800-2900 msnm. ....	36
<b>Figura 7.</b> Biomasa y contenido de carbono por categoría dimétrica en el rango altitudinal 2900-3000 msnm. ....	37

## RESUMEN

El objetivo es estimar el almacenamiento de carbono en gradientes altitudinales en el noreste de México. El área de estudio se localiza en la localidad de Los Charcos, Mezquital, Durango, México. Se realizaron 10 sitios de muestro de forma circular de 1,000 m<sup>2</sup> por gradiente altitudinal: 2700-2800, 2800-2900 y 2900-3000 msnm, se midieron las siguientes variables: altura total, diámetro normal y diámetro de copa de cada individuo. Los gradientes muestran mayor número de individuos en las categorías diamétricas menores. Resulto un mayor número de especies en el rango altitudinal 2800-2900 msnm esto se debe a que en el lugar existe mejor calidad de sitio. *Pinus durangensis* obtuvo el más alto índice de valor de importancia en los primeros rangos altitudinales y *Pinus teocote* en el de mayor altitud. El contenido de carbono por especie en los rangos altitudinales el género *Pinus* obtuvo más carbono en sus componentes arbóreos. Los valores mayores de contenido de carbono por categoría diamétrica en los rangos altitudinales resultaron en 20, 25 y 30 cm. El rango altitudinal con mayor contenido de carbono es 2800-2900 msnm con  $75.88 \pm 24.13$  ton/ha y el de menor es 2700-2800 msnm con  $66.04 \pm 22.74$  ton/ha.

## ABSTRACT

The objective is to estimate carbon storage in altitudinal gradients in northeastern Mexico. The study area is in the town of Los Charcos, Mezquital, Durango, Mexico. Ten circular sampling sites of 1,000 m<sup>2</sup> were made by altitudinal gradients: 2700-2800, 2800-2900 and 2900-3000 masl, the following variables were measured: total height, normal diameter and crown diameter of each individual. The gradients show a greater number of individuals in the smaller diameter categories. A greater number of species resulted in the altitudinal range of 2800-2900 masl, this is due to the fact that there is better quality of the site in the place. *Pinus durangensis* obtained the highest importance value index in the first altitudinal ranges and *Pinus teocote* in the highest altitude. The carbon content by species in the altitudinal ranges of the *Pinus* genus obtained more carbon in its arboreal components. The highest values of carbon content by diameter category in the altitudinal ranges resulted in 20, 25 and 30 cm. The altitudinal range with the highest carbon content is 2800-2900 masl with 75.88 ± 24.13 ton/ha and the lowest is 2700-2800 masl with 66.04±22.74 ton/ha.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo de hoy algunas manifestaciones de dicho cambio son un incremento de cerca de medio grado centígrado desde el siglo pasado (IPCC, 2013). La concentración de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano y óxidos nitrosos en la atmósfera ha aumentado considerablemente, lo cual altera el efecto invernadero, con el consecuente sobrecalentamiento del planeta (IPCC, 2002). El  $\text{CO}_2$ , principal gas de efecto invernadero, incrementó su concentración de 280 ppm en 1750 a 360 ppm en el 2000, el uso de combustibles fósiles genera en la actualidad del 80 al 85% del  $\text{CO}_2$  emitido (Gómez-Echeverri, 2000).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), busca estrategias para aumentar la captura de carbono (C) en ecosistemas terrestres y ayudar a mitigar las emisiones antropogénicas de C (Brown et al., 1996; Metz et al., 2001). Una estrategia es mantener la cobertura forestal y la biodiversidad (Hansen et al., 2013) ya que los bosques destacan como fuentes y sumideros de este elemento (Babst et al., 2013).

Los ecosistemas forestales pueden capturar cantidades significativas de C por lo cual, en los últimos años existe un interés considerable por incrementar el contenido de carbono en la vegetación, mediante la conservación forestal, reforestación, sistemas agroforestales y otros métodos de manejo del suelo. Gran número de estudios han demostrado la capacidad de las especies forestales para almacenar C en su biomasa (Pimienta et al., 2007; Alberto y Elvir, 2005; Roncal-García et al., 2008; Nájera y Hernández, 2009).

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse. El árbol al crecer va incrementado su follaje, ramas, flores, frutos, yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa), raíces, así como altura

y grosor del tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas dando lugar a una competencia entre las copas de los árboles, originando a su vez un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, que, a su vez, aporta nuevamente CO<sub>2</sub> al entorno (Ordóñez, 1999).

Simultáneamente los troncos, al ir incrementando su diámetro y altura, alcanzan un tamaño tal que puedan ser aprovechados con fines comerciales. De este aprovechamiento se extraen productos como: tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados como: muebles y casas. Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado después del cual se degradan aportando C al suelo y CO<sub>2</sub> a la atmósfera producto de su descomposición (Ordóñez y Macera, 2001).

La mayoría de los métodos tradicionales de cálculo de C son destructivos, por ello González-Cásares et al. (2015) mencionan que es necesario buscar alternativas de menor impacto en el ecosistema sin menoscabo de la validez y confiabilidad de los resultados.

La evaluación del C entendida como unidad de masa por individuo inicia con relaciones alométricas entre la biomasa de sus componentes vegetales y un parámetro determinado como diámetro, longitud o área de la sección (Castaño y Bravo, 2012). El porcentaje del 50% de concentración de C se ha empleado de manera genérica con sus implicaciones en el sesgo de las estimaciones (Zhang et al., 2009).

Existen diversas investigaciones sobre el contenido de carbono en diferentes ecosistemas (Maser, 1995; Yereña et al., 2011; Pompa-García et al., 2014; Solano et al., 2018; Cueva et al., 2019), sin embargo, se cuenta con pocos trabajos sobre la dinámica de este elemento en gradientes altitudinales, por lo que se hace necesario iniciar estudios para entender de la manera más precisa y completa, con el fin de debatir su capacidad para proveer este servicio ambiental.

## ANTECEDENTES

### Políticas Internacionales sobre Cambio Climático

Fue a principios de los años setenta, que el tema del cambio climático cobro importancia, al hacerse evidente que las concentraciones de CO<sub>2</sub> estaban aumentando a pasos constantes y que la temperatura de la baja atmosfera también. Como consecuencia se llevó a cabo la primera Conferencia del Clima Mundial, con el objetivo de revisar los conocimientos existentes sobre el cambio y la variabilidad climática debido a las causas naturales y antropogénicas, para evaluar las posibles modificaciones futuras y sus implicaciones en las actividades humanas (Avalos, 2004).

De esta manera en la década de los 80 se estableció el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en ingles), cuya función es evaluar la información científica disponible, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático, y formular estrategias de respuesta (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Así mismo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se planteó por objetivo lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera en un nivel tal, que no se generen interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Por lo que se acordó que se controlarían las emisiones de seis GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PECs) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

El 9 de mayo de 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) adoptada en New York y abierta a la firma en la conferencia “Environment and Development – Earth Summit” de las Naciones Unidas de Rio de Janeiro. Esta convención prevé principalmente evaluar periódicamente los conocimientos científicos sobre el cambio climático gracias a la publicación de los informes de un grupo de expertos, el GIEC/IPCC, creado en noviembre de 1998 (Sánchez, 2008).

El Protocolo de Kyoto adoptado en 1997, estableció la obligación legal de los países desarrollados y países con economías en transición a economías de mercado para reducir en un 5.2% las emisiones de los GEI comparado con los niveles de 1990. Mediante este compromiso surge el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), instrumento por el cual los países desarrollados patrocinan proyectos cuyo objetivo sea disminuir las emisiones de GEI en los países en desarrollo que firmaron el Protocolo y así obtener Certificados de Reducción de Emisiones (CRE), los cuales son aplicables para cumplir con sus propias metas de disminución o colocarlos en el mercado internacional del carbono (Carrillo et al., 2008).

Los compromisos cuantificados de reducción de los gases de efecto invernadero por los países industrializados han sido objeto del protocolo de Kyoto desde 1997 pero las modalidades jurídicas de aplicación han sido definidas en 2001, tras la retirada de las negociaciones de los Estados Unidos. El protocolo ha sido firmado por 84 países y ratificado a finales de mayo del 2002 por la Unión Europea.

En el marco del protocolo de Kyoto la Unión Europea se ha comprometido a reducir un 8% sus emisiones netas de gases de efecto invernadero durante el primer periodo de compromiso (2008-2012), respecto al año de referencia de 1990. El protocolo de Kyoto tiene en cuenta 6 gases de efecto invernadero: el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los hidrofluorcarbonatos, los perfluorcarbonos y el hexafluoruro de azufre (Carrillo et al., 2008).

Este protocolo cubre el conjunto de las fuentes y pozos de estos gases, incluido una parte de los bosques y de los suelos. Según este protocolo los países industrializados y países con economía en transición se han comprometido a reducir el total de sus emisiones en un 5.2% en el primer periodo de compromiso. Los cálculos de las emisiones netas de los componentes de la convención se hacen en equivalentes de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta el potencial de calentamiento global de los diferentes gases de efecto invernadero calculando un horizonte de 20 años (Colonna, 2010).

Por lo antes mencionado y considerando que el principal gas de efecto invernadero causante del calentamiento global es el dióxido de carbono, y tomando en cuenta la capacidad que tiene los ecosistemas forestales para almacenar carbono y utilizarlo

dentro de sus procesos metabólicos, se ha planteado la instalación de sumideros naturales de carbono o captura de carbono en ecosistemas forestales, como una importante medida de mitigación ante el cambio climático. “Esto en consideración de que los bosques representan la mayor parte del almacén de carbono de la biosfera terrestre (alrededor del 80%)” (Cielsa, 2011)

México al ser miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ha aceptado cumplir con una serie de compromisos entre los que destaca elaborar inventarios nacionales de GEI, formular medidas de mitigación y adaptación ante el cambio climático y promover el desarrollo sostenible, entre otros (CMNUCC, 2006). Sin embargo, como país también tiene interés en disminuir las emisiones de GEI a fin de reducir los impactos del cambio climático, y preservar y mejorar los sumideros y reservorios de carbono, por medio de marcos jurídicos y normativos. México tiene como principal instrumento legal/normativo la Ley General de Cambio Climático (LGCC); ésta tiene como objetivo regular, fomentar y posibilitar la instrumentación de la política nacional en relación con el cambio climático e incorporar acciones de adaptación y mitigación, con un enfoque de largo plazo, sistemático, descentralizado, participativo e integral (LGCC, 2015).

La LGCC cuenta con tres ejes estratégicos sobre adaptación y cinco de mitigación; con diferentes líneas de acción entre las que destacan, el desarrollar estrategias, programas y proyectos integrales de mitigación de emisiones de GEI para impulsar el transporte eficiente y sustentable (público y privado); el impulsar mejores prácticas agropecuarias y forestales con el objetivo de incrementar y preservar los sumideros naturales de carbono. Dentro de los sumideros naturales, se incluyen líneas de acciones para: “Diseñar y operar planes, programas y políticas dirigidos a reducir la deforestación y la degradación de bosques y selvas, establecer esquemas de restauración, regeneración o reforestación para la captura y almacenamiento de carbono en Áreas Naturales Protegidas y otros instrumentos de conservación del territorio y ecosistemas terrestres. Implementar esquemas de conservación de suelos, que aseguren su integridad e incrementen la captura de carbono” (CICC, 2013).

El estado de Baja California cuenta con la Ley de Prevención, Mitigación y Adaptación del Cambio Climático desde 2012, que, en materia de mitigación, considera la preservación y el aumento de sumideros de carbono (LPMACC, 2015). Sin embargo, paradójicamente estas leyes solo consideran la protección, mantenimiento y creación de sumideros de carbono en áreas fuera de las zonas urbanas (no incluyendo a los parques urbanos), siendo que las zonas urbanas emiten gran cantidad de CO<sub>2</sub> por lo que es importante que existan sumideros dentro de la ciudad.

### **El Efecto Invernadero**

Nuestro planeta está rodeado por una delgada capa de gases denominada atmósfera compuesta por nitrógeno (78.3%), oxígeno (21.0%), argón (0.3%), dióxido de carbono (0.03%) y otros gases en cantidades menores como helio, neón, xenón. Además de estos gases, la atmósfera contiene aerosoles (partículas) en cantidades variables dependiendo de su origen y concentración, y vapor de agua en concentraciones fluctuantes, este último es responsable de gran parte de los fenómenos meteorológicos. El efecto invernadero es el calentamiento natural de la tierra, se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta, mientras que absorben parte del calor del Sol y mantienen una temperatura apta para la vida, simultáneamente reemiten parte de la radiación infrarroja que el planeta emite de regreso al espacio exterior. Cuanto mayor es la concentración de los gases de invernadero, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen a que se eleve la temperatura superficial del planeta (IPPC, 2001).

Los investigadores estiman que la temperatura de la superficie terrestre se ha incrementado entre 0.6 y 1.0°C durante los pasados 150 años y se incrementará de 1.4 a 5.8° de 1990 a 2100 (Berger, 2002). El año más caliente durante los pasados 1200 años fue 1998 y el siglo más caliente en los últimos 1000 años fue el siglo veinte (Ledley et al., 1999). El panel intergubernamental del cambio climático predice que el nivel del mar se incrementará de 0.09 a 0.88 metros de 1990 a 2100 (Berger, 2002).

Otras probables consecuencias del calentamiento global incluyen sequías, expansión de desiertos, ondas cálidas, disrupción de los ecosistemas, cambios de climas severos, y pérdida de productividad agrícola (Kaya, 2002).

Los gases de invernadero aparte del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se encuentran; vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Ledley et al., 1999; Matthews, 1996), ozono ( $\text{O}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y cloro-fluorocarbonos (CFC's) (Ledley et al., 1999; Morrissey y Justus, 1997). Desde el comienzo del periodo industrial, las concentraciones de los gases de invernadero de origen antropogénico ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC-11 y CFC-12) se han incrementado (Ledley et al., 1999). De todos estos gases el  $\text{CO}_2$  es el principal gas de invernadero de interés debido a su importante presencia en la atmosfera, la proyección de su futuro y su larga persistencia en el ambiente (Ledley et al., 1999). La concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmosfera se ha incrementado de 280 ppmv en la era preindustrial a cerca de 364 ppmv en 1997 (Ledley et al., 1999). De acuerdo con las observaciones de Mauna Loa Observatory, Hawaii, el  $\text{CO}_2$  se ha incrementado más rápidamente en años recientes, de 310 ppmv en 1958 a 370 ppmv en el 2001 (Berger, 2002). Los investigadores han predicho que un doble aumento de la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  podría incrementar la temperatura global de 1 a  $5^\circ\text{C}$  a mediados del presente siglo (Rubin et al., 1992).

Anterior a la revolución industrial, la relativamente constante concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmosfera implicó que las cantidades de  $\text{CO}_2$  generadas por procesos naturales fueran iguales a las cantidades absorbidas por procesos naturales. Sin embargo, la actividad humana, principalmente la quema de combustibles fósiles, produce alrededor de 24 billones de toneladas de  $\text{CO}_2$  por año y solo la mitad de esta cantidad está siendo absorbida por procesos naturales (Morrissey y Justus, 1997).

Una gran cantidad de las emisiones de  $\text{CO}_2$  antropogénico a la atmosfera es resultado del uso de combustibles fósiles para la producción de energía. El uso y producción de carbón es la segunda fuente de emisiones de  $\text{CO}_2$ , contribuyendo con un 33% de todas las emisiones de origen antropogénico, solo por debajo de los productos petrolíferos (EIA, 2004).

De forma general existen dos escenarios para la reducción de emisiones, el escenario de “no tomar ninguna acción” y el de la estabilización de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La diferencia entre los dos escenarios: 1 Giga tonelada por año (Gt/a) en el 2025 y 4 Gt/año en el 2050, proporciona un estimado de las reducciones requeridas de CO<sub>2</sub> para salvar dicha diferencia. Una manera de manejar las emisiones de carbón sería el uso y producción más eficiente de energía para así reducir la necesidad de mayor cantidad de esta y a su vez de fuentes de combustibles fósiles.

Otra opción involucraría el incremento de la dependencia de combustibles y tecnologías de bajo contenido de carbón o libres de carbón, como son la nuclear y fuentes de combustibles renovables. Ambas opciones requerirían en cierta medida la educación de los consumidores y ajustes importantes a nuestro actual estilo de vida. Por lo tanto, es necesaria una solución de manera más inmediata.

La investigación dirigida hacia la reducción de las emisiones de gases de invernadero la cual se ha incrementado en años recientes incluye; nuevas fuentes de energía en desarrollo no basadas en carbón, el mejoramiento de la eficiencia energética de los actuales procesos y la captura de CO<sub>2</sub> y secuestro. En 1991 la Agencia Internacional de Energía (AIE), fundada como un consorcio de organizaciones industriales y gubernamentales, establecieron el Programa de Desarrollo de Investigación en Gases de Invernadero (Matthews, 1996). En 1990, el ministro japonés para el comercio internacional e industrial (MITI) estableció el Instituto de Investigación de Nuevas Tecnologías para a Tierra (RITE) a través de la organización para el desarrollo de nuevas energías (NEDO). RITE tiene laboratorios especializados para sistemas globales de análisis y fijación de CO<sub>2</sub>, así como catálisis, el cual gasta alrededor de 140 millones de USD encaminados a la fijación biológica y utilización del CO<sub>2</sub> y 70 millones de USD para la fijación de CO<sub>2</sub> en áreas desérticas mediante el uso de funciones biológicas (desarrollo de plantas para enverdecer los desiertos mediante el mejoramiento de las funciones catalíticas de la fijación de CO<sub>2</sub> microbiana mediante enzimas) (Matthews, 1996).

El mejoramiento de las eficiencias energéticas y el uso de fuentes de energía han sido las estrategias más efectivas a corto plazo (20 años) para reducir las emisiones de

gases de invernadero. De estas, cinco áreas importantes han surgido: (1) el mejoramiento de la eficiencia de conversión de la energía termo-eléctrica en la plantas de generación eléctrica, (2) el uso de tecnologías basadas en gas natural y sistemas de ciclo combinado (NGCC), (3) el mejoramiento en la eficiencia del combustible para el transporte, en particular para automóviles tales como la introducción de autos híbridos, vehículos a celdas de combustible y vehículos eléctricos, (4) más eficientes sistemas de calentamiento y de agua caliente en edificios y casas y (5) el desarrollo de fuentes de poder a pequeña escala como tales como las celdas de combustible (Kaya, 2002).

A medida que pasa el tiempo estos métodos pueden ser efectivos en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero generalmente estos no son aplicables a un gran número de plantas de potencia basadas en la quema de combustibles fósiles. Por lo tanto, la captura de CO<sub>2</sub> es necesaria para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico durante las próximas décadas. En forma teórica es posible la remoción de CO<sub>2</sub> del aire mediante el mejoramiento de los sumideros naturales, tales como el crecimiento de más algas mediante su fertilización en el océano, plantar árboles y enverdecer los desiertos (Matthews, 1996). Estas ideas tienen importancia en el largo plazo, pero no son prácticas en el presente, por lo tanto, la captura de CO<sub>2</sub> a partir de la emisión durante la quema de combustibles fósiles debe de recibir un énfasis mayor en las actuales actividades de investigación a nivel mundial.

### **Calentamiento global**

El calentamiento global del planeta es el fenómeno del aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos que se ha dado en las últimas décadas debido a los gases de efecto invernadero que se acumulan e incrementan en la atmósfera, atrapando el calor del sol y causando el calentamiento.

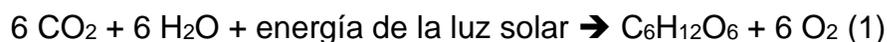
Como consecuencia de la quema de combustibles fósiles y de otras actividades humanas asociadas al proceso de industrialización, la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera ha aumentado de forma considerable en los últimos años. Esto ha ocasionado que la atmósfera retenga más calor de lo debido, y está es la causa de lo que hoy conocemos como el calentamiento global.

El calentamiento global está provocando actualmente serias consecuencias en el planeta entre las que se encuentran: el derretimiento de glaciares, sequías severas que causan mayor escasez de agua, huracanes, ciclones (el calentamiento hace que se evapore más agua de los océanos potenciando estos tipos de eventos), el aumento en los niveles del mar produciendo inundaciones costeras, el trastorno de hábitats como los arrecifes de coral y los bosques podrían llevar a la extinción de especies vegetales y animales ocasionado variaciones en los ecosistemas, olas de calor que provoca la muerte de ancianos y niños, especialmente en Europa, los bosques, los cultivos y las ciudades enfrentarán nuevas plagas y enfermedades (Bird y Molinelli, 2008).

### **¿Qué es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)?**

El dióxido de carbono es comúnmente llamado ácido carbónico el cual es un componente natural del ambiente. El dióxido de carbono es una molécula con la fórmula molecular CO<sub>2</sub>. Esta molécula lineal está formada por un átomo de carbono que está ligado a dos átomos de oxígeno, O = C = O. A pesar de que el dióxido de carbono existe principalmente en su forma gaseosa, también tiene forma sólida y líquida. Solo puede ser sólido a temperaturas por debajo de los 78° C. El dióxido de carbono líquido existe principalmente cuando el dióxido de carbono se disuelve en agua, solamente es soluble cuando la presión se mantiene a valores altos, cuando la presión desciende intentará escapar al aire, dejando una masa de burbujas de aire en el agua. El carbono almacenado en los combustibles fósiles tales como el petróleo y gas natural una vez combinado con oxígeno produce CO<sub>2</sub> al reaccionar con este, así mismo el CO<sub>2</sub> también se encuentra en forma de diversos carbonatos en los minerales naturales tales como la piedra caliza, en los océanos, este también está implicado en la fotosíntesis y respiración celular (reacciones 1 y 2):

fotosíntesis:



respiración celular:



Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se incrementaron de 280 partes por millón (ppm), en los tiempos previos a la industrialización (1750), hasta 367 ppm en 1999, es decir hubo un aumento del 31 % (IPCC, 2001). En 2016 la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> alcanzó 403.3 ppm, superando la barrera de los 400 que rebasó por primera vez en 2015. La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2018) señala que la concentración actual de CO<sub>2</sub> en la atmósfera representa el 146 % de los niveles preindustriales.

Para el año 2100, los modelos del ciclo del carbono proyectan concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera entre 540 y 970 ppm, estas concentraciones son mayores en 90 y 250 % respectivamente (IPCC, 2001). Los efectos netos de las proyecciones indican una disminución en los volúmenes de hielo de los polos y un aumento del nivel del mar en el rango de 0.09 a 0.88 m, se estima que la temperatura media de la superficie del planeta podría aumentar de 1.4 a 5.8 °C (McCarthy *et al.*, 2001).

El más reciente estudio de las emisiones es el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI), periodo 1990-2010 en cual totalizó 748 millones de toneladas en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq.), lo que indica un incremento de 33.4 % con respecto al año base 1990, con una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 1.5 %. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en el país provienen principalmente por la quema de combustibles fósiles, Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS) y procesos industriales. Las emisiones de GEI por habitante, considerando únicamente las emisiones de CO<sub>2</sub> por consumo de combustibles fósiles en el INEGEI, se ubican en 3.75 toneladas en 2009, y la media mundial en 4.1 toneladas de CO<sub>2</sub> (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2013).

De esta manera, analizando los datos existentes sobre las emisiones y la fijación de CO<sub>2</sub> a través del flujo del carbono, se puede comprobar cómo parte de estas son absorbidas por la atmósfera y por los océanos, y una parte más pequeña por los sistemas forestales (11.11 %) (Tabla 1). Es decir, a nivel global existe una captura neta por parte de los bosques, pero a niveles reducidos. Si se consideran los datos brutos, es decir descontando las emisiones debidas al Cambio de Uso de Suelo (CUS), la

importancia de la captura sube hasta un 36.5 %, cifra similar a la de los océanos, lo que señala que la deforestación es culpable de la cuarta parte de las emisiones de este gas (Díaz y Romero, 2004).

**Tabla 1.** Emisiones y captura media anual de CO<sub>2</sub> a nivel global, 1989 a 1998.

<b>Balance anual de medios de CO<sub>2</sub> (Gt C año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
Emisiones provenientes de la quema de combustibles de origen fósil y la producción de cemento	6.3 ± 0.6	100
Almacenamiento en la atmosfera	3.3 ± 0.2	52.3
Absorción por los océanos	2.3 ± 0.8	36.5
Absorción terrenal neta = (1) – (2) + (3)	0.7 ± 1.0	11.1
Emisiones debidas al Cambio de Uso de Suelo (CUS)	1.6 ± 0.8 <sup>a</sup>	25.3
Absorción terrenal residual = (4) + (5)	2.3 ± 1.3	36.5

<sup>a</sup> esta cifra representa las emisiones anuales medidas para 1989-1995 sobre las que se disponen datos. Los límites de error corresponden a un intervalo estimado de confianza del 90 %.

Fuente: Días y Romero (2004).

Asumiendo la cifra anterior sobre la captura que a nivel global realizan las masas forestales, a continuación, se presenta la fijación por ecosistema (Tabla 2).

**Tabla 2.** Carbono almacenado en ecosistemas terrestres de México (tCha<sup>-1</sup>).

<b>Ecosistemas</b>	<b>Vegetación aérea</b>	<b>Suelo</b>	<b>Raíces</b>	<b>Total</b>
Bosque de coníferas	118	120	19	257
Bosque Quercus	105	126	5	236
Bosque Tropical Perennifolio	186	115	4	305
Bosque Tropical caducifolio, Subcaducifolio y Espinoso	64	100	0	154
Bosque Mesófilo de Montaña	189	205	36	430
Matorral xerófilo y vegetación semiárida	19	60	1	80
Pastizal natural, halófilo y gipsófilo	16	81	0	97
Vegetación acuática y subacuática	223	59	0	282
Promedio 8 ecosistemas terrestres	113.7	108.2	8.1	230.1

Fuente: Vega (2009).

De acuerdo al cuadro anterior, el carbono es absorbido tanto por la vegetación como por el suelo. Actualmente la cantidad de carbono almacenado en el suelo es mucho mayor que en la vegetación.

Un ciclo biogeoquímico describe los movimientos y las interacciones de los elementos químicos esenciales para la vida, donde hasta una sola sustancia puede convertirse en el factor limitante en el desarrollo de un ecosistema (Ludevid, 2010). El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biosfera terrestre, los océanos y los sedimentos. Estos depósitos son considerados como fuentes o sumideros en función de la liberación o absorción de carbono, respectivamente; y este intercambio es denominado flujo (FAO, 2009). El carbono es el elemento esencial de todos los compuestos orgánicos y está implicado en el flujo y fijación de energía a través de la fotosíntesis (Smith y Smith, 2004).

Las actividades humanas basadas en la combustión de biomasa, extracción y uso de combustibles fósiles son una fuente indirecta de CO<sub>2</sub> que se ha integrado a su ciclo. Alrededor del 50% del metano presente en la atmósfera proviene de la combustión de biomasa y de extracción de combustibles fósiles; mientras que cerca del 40% del monóxido de carbono proviene del uso de combustibles fósiles. Estos compuestos al reaccionar con los radicales hidróxilos en la tropósfera forman CO<sub>2</sub> (Ludevid, 2010).

En el caso específico del CO<sub>2</sub> atmosférico, es absorbido por las plantas y otros organismos, a través del proceso de la fotosíntesis, el C es fijado en la biomasa. Aunque una parte es respirada otra queda retenida en la biomasa y se conoce como carbono fijado, y constituye un depósito de C. Por tanto, se define como depósito de carbono: todo componente del sistema climático que almacena un gas de efecto invernadero o un precursor del mismo. En este contexto la permanencia o periodo de tiempo en el que el carbono está retenido en la biomasa, y como consecuencia, fuera de la atmósfera, es un aspecto crítico. La cantidad de tiempo que permanece fijado en la biomasa vegetal depende de varios factores, tales como la respiración, los incendios y plagas, el aprovechamiento maderable, la deforestación y el cambio de uso de tierra; todos estos factores regulan la pérdida de carbono acumulado, y en consecuencia las políticas destinadas a la prevención de alguna de ellas, o el desarrollo y control de

otras permitirá un aumento o disminución de los sumideros (Figueroa y Redondo, 2007).

Se estima que el CO<sub>2</sub> es el responsable del 71.5% del efecto invernadero (Lashof y Ahuja, 1990). El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo, son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera relacionada con el cambio climático global (Mintzer, 1992).

El CO<sub>2</sub> participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento, así como su altura y grosor. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO<sub>2</sub> al entorno. Simultáneamente, los troncos al ir aumentando su diámetro y altura alcanzarán un tamaño aprovechable en términos comerciales, pudiéndose extraer productos como tablas, tablones y polines, que darán origen a subproductos elaborados, como muebles y casas (Mintzer, 1992).

Estos productos finales tienen un tiempo de vida determinado, después del cual se degradan aportando C al suelo y/o a la atmósfera. Durante el tiempo en que el C se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera, se considera almacenado. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa) el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo del carbono (Ordoñez, 1999)

El bosque es eliminado por medio de la quema, lo que afecta principalmente la parte de biomasa que está sobre la tierra y una pequeña parte del carbono en el suelo hasta 3 cm de profundidad (Choné et al., 1991). La quema y la mineralización de la materia orgánica resultante proporcionan nutrientes para el crecimiento de las plantas (Ordoñez, 1999).

La magnitud de las pérdidas posteriores del carbono que queda en el suelo dependerá del tipo de uso del suelo que reemplace la cobertura forestal, bajo las condiciones de la labranza convencional, la pérdida de carbono será considerable, de 40 a 50 % en unas pocas docenas de años con un alto nivel de liberación del mismo durante los primeros cinco años, estas pérdidas son debidas sobre todo a la labranza (FAO, 2009).

### **Biomasa y carbono en los ecosistemas terrestres**

La cuantificación de biomasa en bosques naturales es uno de los principales temas en relación al problema del calentamiento global. El interés por estudiar la importancia de los bosques en los ciclos de elementos biogeoquímicos en especial del carbono, empezó recientemente en los últimos años, “debido a que se ha determinado que los árboles a lo largo de todo su crecimiento renuevan de materia estable parte de sus órganos (Rodríguez et al., 2006).

Este proceso libera gran cantidad de carbono que se incorpora a la atmosfera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el restante se queda concentrado en el suelo en forma de humus estable. Frente a este proceso, se produce anualmente un aumento de las dimensiones del árbol que se da lugar a partir de la acumulación del carbono (Rodríguez *et al.*, 2006).

Al momento que el dióxido de carbono atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, pasa a formar parte importante de la composición de la madera y todos los demás tejidos necesarios para el desarrollo de la planta. El balance entre el carbono capturado en la especie forestal, como resultado de su crecimiento, y el liberado de la descomposición y el desprendimiento de ramas, hojas, frutos, corteza, etc., establece la fijación neta de carbono por árbol. Para la masa forestal se puede emplear el mismo razonamiento incluyendo el balance neto de todas las especies vegetales que lo componen (Nogués et al., 2010)

En el ámbito internacional se ha puesto en marcha estrategias para la mitigación del calentamiento global como las negociaciones de bonos de carbono, para que estas estrategias sean una realidad en los proyectos forestales es necesario medir y monitorear el carbono almacenado. El cálculo de la biomasa es el primer paso para

evaluar la productividad de los ecosistemas y su contribución en el ciclo global del carbono (Álvarez, 2010).

Para estimar la biomasa aérea de un bosque existen los métodos directos e indirectos. El método directo fundamenta lo siguiente; se debe medir los parámetros básicos de un árbol (entre los más importantes el diámetro a la altura del pecho, altura total, diámetro de copa y longitud de copa); derribarlo y calcular la biomasa pesando cada uno de los componentes (fuste, ramas y follaje), es denominado también método destructivo (MDL, 2008).

Otra forma es calcular la biomasa aérea es de manera indirecta a través de ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos por análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales y el peso de los componentes (Segura y Andrade, 2008). La utilización de este método básicamente consiste en cubicar los árboles y estimar volúmenes de la madera mediante la toma de muestras, se puede estimar parámetros necesarios como el peso seco y la densidad de la madera necesarios para estimar la biomasa total.

Dávalos, Rodrigues y Martínez (2008) afirma que: la cantidad de carbono almacenado para diversos tipos de bosques naturales, secundarios y plantaciones forestales, casi en su totalidad asume el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50% para todas las especies en general. Este método es utilizado cuando existen árboles de grandes dimensiones y en casos en los que se requiere conocer el carbono de un bosque sin necesidad de derribar los árboles.

Dávalos et al. (2008), dentro de su libro *Medición de Árboles y Masas Forestales*, afirma que los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el volumen, biomasa y el carbono de los árboles en función de variables de fácil medición, como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y/o la altura total de los árboles.

En este sentido para los proyectos de cuantificación de carbono en bosques, plantaciones o sistemas agroforestales es fundamental la generación de modelos alométricos locales para la adecuada estimación del carbono almacenado en estos ecosistemas. Se debe ejecutar un muestreo destructivo de manera obligatoria para el

desarrollo de estos modelos. El tamaño de muestra debe ser definido de manera que el error de predicción del modelo resultante esté dentro de los rangos aceptados; en general, se estima que se obtienen valores del error aceptables con tamaños de muestra mayores a 20 individuos distribuidos sobre todo en los rangos de diámetro.

Para obtener la biomasa total de cada individuo se realiza la suma de la biomasa de los distintos componentes del árbol. Al momento de ser obtenida la biomasa total de los árboles muestreados se intenta obtener, mediante técnicas estadísticas, relaciones directas entre la biomasa total del árbol y las variables del mismo medidas en pie. Para calcular la biomasa viva con base en ecuaciones alométricas conviene diseñar un muestreo estadísticamente representativo en el que se midan las variables independientes de la ecuación alométrica seleccionada. Los datos finales pueden ser presentados por clase diamétrica (Dávalos *et al.*, 2008).

En lo que respecta a las propuestas de estimación por árbol, Popescu (2007) presenta un método que muestra dos fases: primero, después de obtener la altura y el diámetro de copa por árbol, mediante regresiones estima el diámetro a la altura de pecho y la biomasa, y después introduce un segundo método de cálculo de biomasa e incluso la proporción de ésta que pertenece a cada parte del árbol (biomasa del follaje, de las raíces, de la corteza y del tronco) mediante ecuaciones alométricas, presentando un RMSE de 169 kg por árbol, lo cual representa el 47 % de la media.

En general, la forma de trabajo es un poco diferente: se segmentan los datos por árbol y se agregan para, mediante regresiones, estimar la biomasa por área. Popescu *et al.* (2003) utilizaron variables derivadas de las alturas y de la copa de los árboles por parcela, obteniendo un RMSE de la biomasa de 31.28 ton/ha. Bortolot y Wynne (2005) utilizaron las variables independientes tomadas de los percentiles de alturas y número de árboles detectados por área, para obtener un RMSE de la biomasa de 13.9 ton/ha, representando el 14.9 % de la media.

El término sumidero de C se aplica al área donde el rango de captura de C por los organismos vivos excede el rango de liberación, acumulándose en formas orgánicas e inorgánicas (Brown, 1996; Tipper y De Jong, 1998).

Un reservorio de carbono es un depósito o almacén que puede funcionar como fuente o sumidero. Pardos (2010) documenta que el proceso, en el caso de los ecosistemas vegetales, es el siguiente:

1. Absorción por fotosíntesis
2. Carbono incorporado al suelo desde la vegetación, COS.
3. Pérdida de C del suelo (mineralización, respiración heterotrófica, etc.)
4. Emisiones por respiración autotrófica y emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs)
5. Retirada de carbono por eliminación de la vegetación (cosecha, explotación forestal, incendio, etc.)

Si los procesos 1 y 2 producen más absorciones que emisiones se derivan de los procesos 3, 4 y 5, el reservorio será considerado sumidero de C, mientras que, si es al revés, si hay más emisiones que absorciones, el reservorio se considerará una fuente.

Desde 1900 ha existido un interés por reverdecer las zonas urbanas y maximizar los beneficios ambientales que la vegetación brinda (Urquiza, 2015), por lo mismo, han surgido investigaciones sobre dicha relación (Nowak y Crane, 2002; Johnson y Gerhold, 2003; Stoffberg *et al.*, 2010; Escobedo *et al.*, 2011; Mcpherson *et al.*, 2013; Yajie *et al.*, 2014). Sin embargo, antes del 2010, la influencia de las áreas verdes urbanas sobre la calidad del aire y particularmente sobre las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, fue escasamente estudiada (Yang *et al.*, 2005; Weissert *et al.*, 2014).

Algunos estudios previos a ese año han resaltado el papel que juegan los árboles urbanos en el mejoramiento de la calidad del aire, cuantificando su potencial de captura de carbono (Yang *et al.*, 2005). Actualmente se sabe que el secuestro de C está directamente relacionado con la tasa de variación interanual de carbono almacenado en la biomasa sobre y bajo el suelo (McPherson, 1998). Otros análisis comparativos han encontrado que existe una diferencia en el potencial de captura C entre bosques naturales y urbanos (Hyun-Kil, 2002).

También se ha reportado que la capacidad de captura de C puede variar debido a que la tasa de crecimiento de la vegetación urbana se ve alterada por el aumento de la temperatura (islas de calor), mayor deposición de nitrógeno y otros contaminantes (Wang y Pataki, 2010). Incluso se sabe que la densidad de los árboles urbanos es más baja en comparación con los bosques naturales, lo que reduce la competencia entre ellos, cambiando su forma de crecimiento y alometría, lo que permite capturar y almacenar más C (McHale et al., 2009).

De acuerdo con Torres y Guevara (2007), el manejo apropiado de la vegetación es un mecanismo para la reducción de concentraciones de C a nivel global, y por consecuencia la captura de C a través de la vegetación se transforma en una estrategia potencial. La vegetación almacena y libera carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de materia seca, el saldo es una captura neta positiva cuyo monto depende del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, así como de la edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta. En el 2014 se empezó a hablar de la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los bosques urbanos en las ciudades (Weissert et al., 2014).

En la estimación del carbono acumulado en los distintos ecosistemas, se utilizan los inventarios de carbono, que contabilizan el carbono fijado al momento de las mediciones. Es importante que estos sean confiables, es decir, se basen en principios y procedimientos aceptados de inventario, muestreos y ciencias del suelo (Schlegel, Gayoso y Guerra, 2001). Las unidades de medida utilizadas en los stocks de carbono, se expresan en términos de peso de carbono por unidad de área y los valores de los flujos siempre incluyen la variable tiempo (MgC/ha/año) (Honorio y Baker, 2010).

Existen diferentes metodologías a nivel internacional y nacional para la cuantificación de carbono y CO<sub>2</sub>, ya sea en sistemas agroforestales, cultivos, bosques, sotobosque, suelos, etc. Algunas metodologías principales internacionales, es la del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), para proyectos de reforestación y forestación, y el TÜV SÜD Industrie para el desarrollo de proyectos de reducción de emisiones derivados de la deforestación en países en desarrollo (REDD). Estas dos metodologías hacen referencia de qué forma cuantificar el stock de carbono para la

línea base de proyectos. Además, las metodologías desarrolladas por instituciones internacionales para el inventario de carbono, siguen los principios de un inventario forestal, determinación de fuentes y cálculo del carbono en las fuentes (MINAM, 2009).

Pompa-Garcia *et al.* (2014) determinaron la concentración de C en los principales componentes de *Arbutus bicolor*, esta especie ha sido recientemente descrita y juega un papel importante en la biodiversidad de los bosques mexicanos. La concentración de C total expresado como porcentaje de biomasa, se determinó mediante el *Solids TOC Analyzer*. Los análisis de varianza evidenciaron que la concentración de C varió entre componentes. Las pruebas de Tukey distinguieron que los frutos y hojas tuvieron valores más altos (51.51% y 50.96%, respectivamente), en contraste con las raíces que registraron los menores (46.22%), mientras que el resto de los componentes presentaron concentraciones intermedias y no variaron significativamente entre sí.

Un estudio realizado por Álvarez (2010) en los bosques de la comunidad indígena de Santa Cruz Tepetotutla, Oaxaca, reportan que el contenido de biomasa arbórea denotó un patrón complejo con respecto a la altitud: el valor máximo se registró a 2500 msnm y representó casi el doble (1.8 veces) de lo estimado en 1950 y 2400 msnm y 1.2 veces el valor a 1500 msnm de altitud. Estas diferencias se relacionan con la estructura y composición florística de las comunidades vegetales descritas por Meave *et al.* (2006) y por Álvarez (2010), que apoyan lo descrito por Brown y Lugo (1982) y Clark y Clark (1996), quienes indican que la presencia de árboles con DAP > 70 cm en bosques tropicales y subtropicales incrementa considerablemente los contenidos de biomasa. Esto se manifestó notablemente en la comunidad vegetal situada a 2500 msnm, donde este segmento (DAP > 70 cm) representó casi 70 % de la biomasa arbórea, en tanto que para los sitios restantes sólo representó entre 9 y 33 %.

Cueva *et al.* (2019) demostraron en una investigación realizada en el bosque seco Andino, Loja, Ecuador, que la composición florística y la estructura están asociadas con la altitud. Sin embargo, no hay correlación entre la altitud y diversidad. La mayor riqueza y biomasa se registró en la zona de mayor altitud, lo cual es un patrón atípico en la vegetación andina, cuando se compara con los bosques de la cordillera occidental de Los Andes ecuatorianos y de los bosques tropicales de tierras bajas. La

diversidad no presenta diferencia significativa entre las zonas, lo cual indica que no existe una asociación con la altitud. En la composición florística, la diversidad de especies de la familia Myrtaceae es otro patrón atípico que se encontró, debido a que el patrón típico es reportar a las familias Asteraceae y Fabaceae como características de estos ecosistemas. Por lo tanto, la altitud es una variable geográfica que incide en cambios significativos en la composición florística y estructura de la vegetación, lo cual influye en la acumulación de biomasa.

Solano *et al.* (2018) citan que las reservas de C y N en el suelo de los matorrales secos montanos del sur de Ecuador mostraron un incremento con la altitud, mientras que la profundidad presentó efecto únicamente en la reserva de C. De acuerdo a estos resultados se podría decir que las zonas altas de los matorrales secos del sur del Ecuador son más fértiles, principalmente por la influencia de variables climáticas como, baja temperatura y alta precipitación que influyen en la tasa de descomposición y acumulación de materia orgánica. Podemos considerar a la altitud como un factor influyente en la variación de las reservas de C y N en los ecosistemas de matorral seco ecuatoriano. La conservación de estos sumideros de C y N es importante para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y atenuar los efectos del calentamiento global en ecosistemas de matorral seco neotropical. Complementando con una gestión adecuada del uso de estos suelos que evite la pérdida de estas reservas de C y N en el suelo de los matorrales secos.

Pompa-García y Yerena-Yamallel (2014) realizaron un trabajo donde se documentan que la concentración promedio de carbono en *Pinus cembroides* varía desde 47.7 % en el caso del tallo, hasta 57.1 % en la yema. Las ramas, la raíz, la corteza y las hojas presentaron 47.8, 49.0, 49.1 y 51.3 %, respectivamente. Las yemas contienen altas tasas de compuestos volátiles, lo que en las comunidades europeas ha derivado en usos con fines médicos (Macchioni et al., 2009). Los volátiles implican concentraciones de carbono que deben considerarse en las evaluaciones de dicho elemento en las especies forestales. Las hojas ocuparon el segundo lugar en la capacidad para almacenar carbono. Algunos autores argumentan que, a pesar de tener menor

cantidad de celulosa, las hojas son ricas en sustancias volátiles de alta concentración de carbono, por los procesos de fotosíntesis que ahí ocurren (Yerena et al., 2011). El tallo y la rama tuvieron los valores más bajos, siendo similares entre sí. Dicha similitud es atribuida a la composición química de celulosas y lignina que en su mayoría constituyen la madera (Fonseca, 2012). La corteza y la raíz presentaron valores intermedios, lo que para algunos autores es causa del contenido de celulosa, hemicelulosa y almidones caracterizados por bajas concentraciones de carbono (Valentín et al., 2009).

Lefsky *et al.* (1999) obtienen índices de altura obtenidas del perfil del dosel del área de estudio y reporta una subestimación de la biomasa de 16 ton/ha; Jochem *et al.* (2010), presentan una ecuación de biomasa en función del volumen del dosel, calculado tanto a partir de la nube de puntos como del raster generado por la misma nube, y obtiene desviaciones estándar de 87.60 ton/ha utilizando los puntos, y 84.11 ton/ha utilizando raster; Hall et al. (2005) calculan la biomasa total y la del follaje utilizando estadísticas de altura, intensidad, energía y tipo de puntos de la nube; y Bortolot (2006), con su propuesta de identificar grupos de árboles en la imagen generada de la nube, obtiene un RMSE del 13.3 % del valor de la media.

## HIPÓTESIS

**Ho.** Existe diferencia en el contenido de carbono almacenado en los gradientes altitudinales.

**Ha.** No existe diferencia estadística en el contenido de carbono almacenado en los gradientes altitudinales.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Estimar el almacenamiento de carbono en gradientes altitudinales en el noreste de México.

### Objetivos específicos

- Determinar el número de individuos por categorías diamétricas.
- Evaluar dominancia, densidad, frecuencia e índice de valor de importancia.
- Estimar la biomasa aérea arbórea mediante ecuaciones alométricas.
- Estimar el contenido de carbono en los gradientes altitudinales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

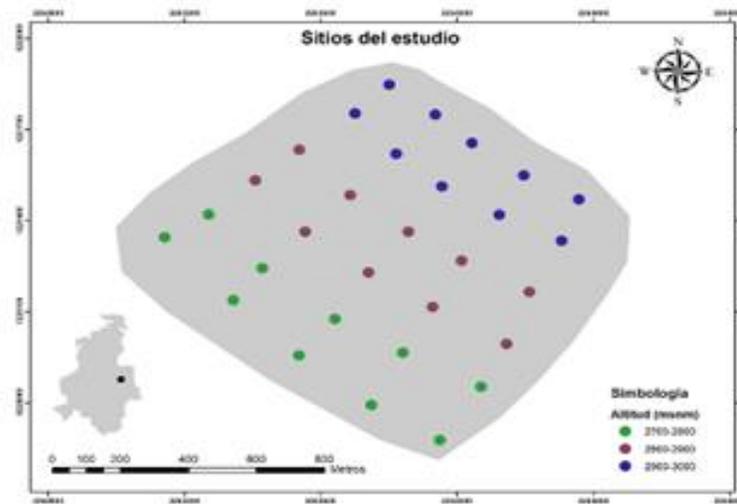
El área de estudio se localiza en la localidad de los Charcos, Mezquital, Durango, México, en las coordenadas geográficas  $25^{\circ} 02' 28''$  N,  $99^{\circ} 53' 25''$  W, se ubica a una altura de 2700 a 3000 metros sobre el nivel del mar. La vegetación de la zona está compuesta por bosque de pino y encino los cuales se localizan en áreas que favorecen su crecimiento.

### Metodología

Se utilizó un diseño de muestreo sistemático para la toma de datos dasométricos en campo, se implementaron sitios circulares con un radio de 17.84 m, obteniendo una superficie de  $1,000 \text{ m}^2$ , se realizaron en el rango de altitud de 2700-3000 msnm, en un tipo de vegetación de bosque templado frío, su aplicabilidad radica en la facilidad para

delimitarlos y por la forma inciden menos árboles en la orilla (Romahn y Ramírez, 2010; Emanuelli *et al.*, 2017).

En cada sitio circular se midieron a todos los individuos las variables: diámetro normal, altura y diámetro de copa, utilizando cinta diamétrica, cinta métrica e hipsómetro. Se realizaron 10 sitios por cada gradiente altitudinal, 2700-2800, 2800-2900 y 2900-3000 msnm (Figura 1). Para la identificación de las especies fue necesario colectar muestras de cada una para posteriormente ser clasificadas utilizando manual de identificación.



**Figura 1.** Distribución de los sitios de muestreo.

## Parámetros ecológicos

Los parámetros ecológicos evaluados son: Dominancia relativa, Densidad relativa, Frecuencia relativa e Índice de valor de importancia (Tabla 3).

**Tabla 3.** Ecuaciones para determinar los parámetros ecológicos.

<b>Dominancia</b>	<b>Densidad</b>	<b>Frecuencia</b>
Dominancia relativa= (Dominancia absoluta por especie) / (Dominancia absoluta de todas las especies) ×100  donde: Dominancia absoluta= (Área basal de una especie) / (Área muestreada)	Densidad relativa= (Densidad absoluta por cada especie) / (Densidad absoluta de todas las especies) ×100  donde: Densidad absoluta= (Número de individuos de una especie) / (Área muestreada)	Frecuencia relativa= (Frecuencia absoluta por cada especie) / (Frecuencia absoluta de todas las especies) ×100  donde: Frecuencia absoluta= (Número de sitios en los que se presenta cada especie) / (Número total de sitios muestreados)
<b>Índice de valor de importancia (IVI)</b>		
Índice de valor de importancia IVI= (Dominancia relativa + Densidad relativa + Frecuencia relativa) / 3		

## Biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas

Una estimación de la cantidad de carbono en un bosque requiere que inicialmente se estime el peso seco de la biomasa y posteriormente la concentración de carbono de la especie:

$$\text{Contenido de carbono} = B * CC$$

donde:

B = biomasa aérea (peso seco de los árboles y/o arbustos)

CC = concentración de carbono

La biomasa se estimó mediante ecuaciones alométricas (son fórmulas matemáticas que relacionan la biomasa del árbol (kg) con sus dimensiones en pie, como altura total y diámetro del fuste de los árboles y/o arbustos) específicas para especies o grupo de especies, método no destructivo propuesto por Brown et al. (1989) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa aérea.

Especie	Ecuación de biomasa	Autor
<i>Pinus spp</i>	$Ww = 0.0291d^{1.74165} h^{1.16614}$	Vargas-Larreta et al., 2017
	$Wb = 0.02029d^{1.33299} h^{0.92887}$	
	$Wbr = 0.02508d^{1.83773} h^{0.54626}$	
	$Wf = 0.05227d^{1.28231} h^{0.43275}$	
	$Wt = SWi$	
<i>Quercus spp.</i>	$Ww = 0.11618d^{1.77395} h^{0.68708}$	Carrillo et al., 2014
	$Wb = 0.00827d^{2.54589} h^{0.34229}$	
	$Wbr = 0.0502 d^{1.97638} h^{0.34229}$	
	$Wf = 0.08234d^{1.59396} h^{0.34229}$	
	$Wt = SWi$	
<i>Alnus jorullensis</i>	$B = 0.0195 * d^{2.7519}$	Carrillo et al., 2014

donde: B= biomasa; d = diámetro normal a la altura del pecho (cm); h= altura total (m); Ww = biomasa de madera del tallo (kg); Wb = biomasa de la corteza del tallo (kg); Wbr = biomasa de la madera más la corteza de las ramas (kg); Wf = follaje (hojas / agujas) biomasa (kg); Wt = biomasa aérea total (Ww + Wb + Wbr + Wf) (kg).

Para obtener el contenido de carbono a partir de la biomasa aérea se utilizó la concentración de carbono por especie según lo reportado en la literatura (Tabla 5).

**Tabla 5.** Concentración de carbono por especie.

<b>Especie</b>	<b>CC</b>	<b>Referencia</b>
<i>Pinus ayacahuite</i>	0.49	Yerena-Yamallel <i>et al.</i> , 2012
<i>Pinus arizonica</i>	0.49	
<i>Pinus duranguensis</i>	0.51	Vargas-Larreta <i>et al.</i> , 2017
<i>Pinus cooperi</i>	0.49	
<i>Pinus teocote</i>	0.51	
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.44	
<i>Quercus durifolia</i>	0.47	
<i>Juniperus deppeana</i>	0.49	
<i>Quercus eduardii</i>	0.45	
<i>Quercus sideroxyla</i>	0.47	
<i>Quercus rugosa</i>	0.44	
<i>Alnus jorullensis</i>	0.46	

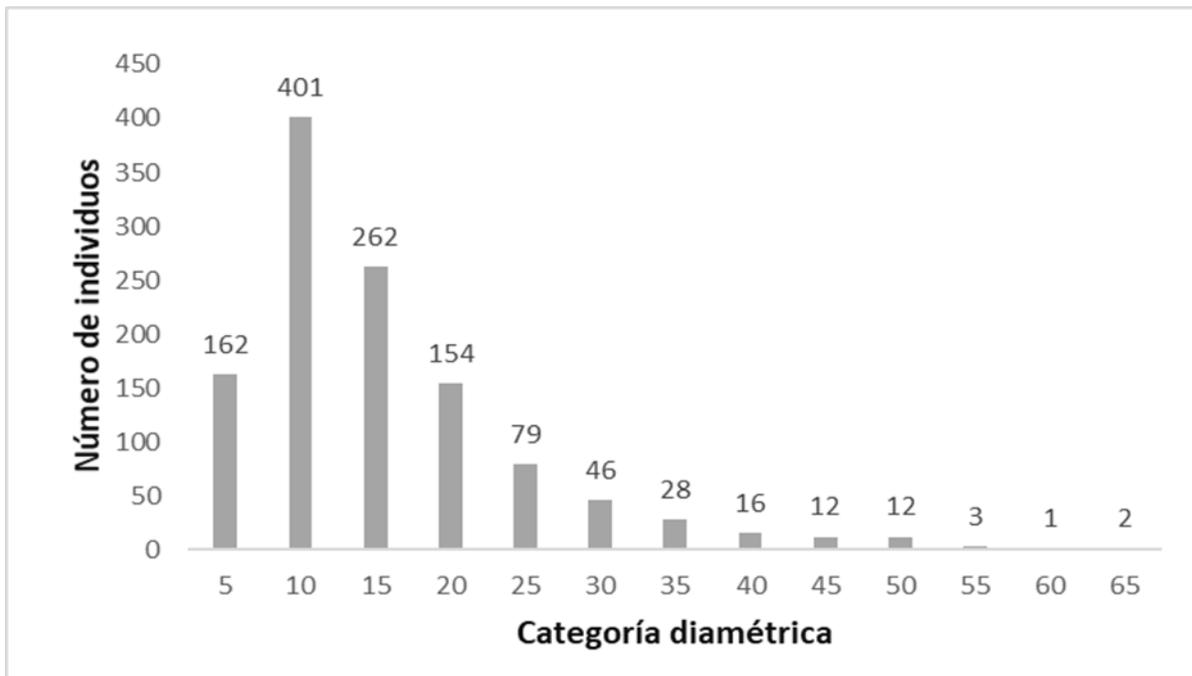
CC= concentración de carbono.

Para determinar si existen diferencias entre los contenidos de carbono de los gradientes altitudinales, los resultados de contenido de carbono se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA, con un nivel de significancia de  $P \leq 0.05$ ) para determinar si existen efectos significativos, y cuando resulte significancia en la prueba, se procedió a realizar un análisis de comparación de medias a través de la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

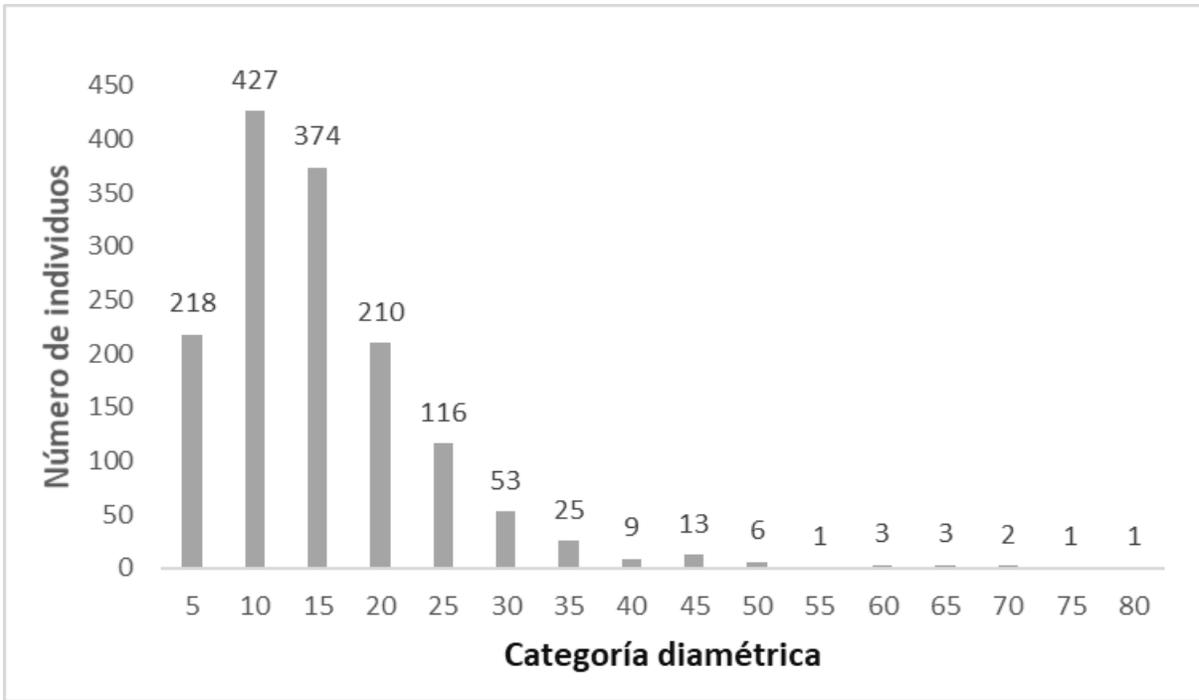
## RESULTADOS

### Número de individuos por categorías diamétricas

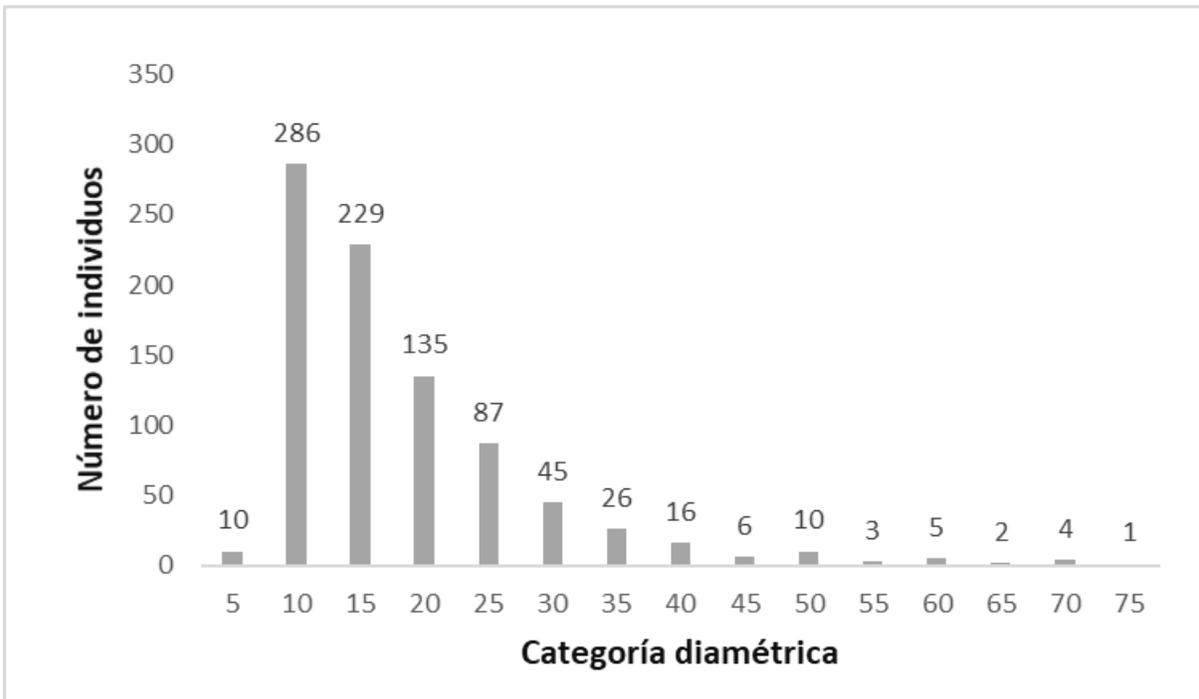
Las categorías diamétricas por rango altitudinal muestran semejanzas entre sí en el número de individuos. En el rango altitudinal 2700 a 2800 msnm, resultaron 13 categorías diamétricas y el mayor número de individuos se registró en categorías diamétricas menores, en el rango altitudinal 2800 a 2900 msnm son 16 categorías diamétricas (Figura 2 y 3). En el rango altitudinal 2900-3000 msnm se obtuvieron 15 categorías diamétricas con un mayor número de individuos en categorías diamétricas menores, demostró ser un área con calidad de sitio y presencia de regeneración natural (Figura 4)



**Figura 2.** Número de individuos por categoría diamétrica en el rango altitudinal 2700-2800 msnm.



**Figura 3.** Número de individuos por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2800-2900 msnm.



**Figura 4.** Número de individuos por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2900-3000 msnm.

## Parámetros ecológicos

Al realizar los análisis de los parámetros ecológicos de cada especie y por rango altitudinal se obtuvo los siguientes resultados:

En el rango altitudinal de 2700-2800 msnm la mayor abundancia la obtuvo *Pinus durangensis* con un 37.61% mientras que la menor fue *Quercus durifolia* con un 0.08%, mientras que la mayor dominancia se presentó en *Pinus cooperi* con un 28.67% seguido por *Pinus durangensis* con 27.99% y el menor porcentaje resulto en *Quercus rugosa* 0.08%. La frecuencia más alta la obtuvieron tres especies *Pinus durangensis*, *Pinus teocote* y *Quercus eduardii* con un porcentaje de 16.95% y la menor fue *Quercus durifolia* con 1.69%. Al final se estimó el índice de valor de importancia para cada especie donde resulto que el valor más alto lo obtuvo *Pinus durangensis* con un 27.51% y el menor fue *Quercus durifolia* con un 1.00%. (Tabla 6).

**Tabla 6.** Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2700-2800 msnm.

<b>Especie</b>	<b>Abundancia</b>	<b>Dominancia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>IVI</b>
<i>Arbutus xalapensis</i>	3.90	1.97	11.86	5.91
<i>Juniperus deppeana</i>	1.27	0.75	8.47	3.50
<i>Pinus arizonica</i>	0.17	0.14	3.39	1.23
<i>Pinus ayacahuite</i>	1.10	1.75	6.78	3.21
<i>Pinus cooperi</i>	23.26	28.67	10.17	20.70
<i>Pinus durangensis</i>	37.61	27.99	16.95	27.51
<i>Pinus teocote</i>	20.37	15.00	16.95	17.44
<i>Quercus durifolia</i>	0.08	1.23	1.69	1.00
<i>Quercus eduardii</i>	11.46	21.46	16.95	16.62
<i>Quercus rugosa</i>	0.17	0.08	3.39	1.21
<i>Quercus sideroxylla</i>	0.59	0.97	3.39	1.65
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

En el rango altitudinal de 2800 a 2900 msnm se obtuvieron diferentes porcentajes de los parámetros ecológicos, *Pinus durangensis* resulto con los valores mayores con 40.49% en abundancia y dominancia con un 38.84%, los valores menores fueron para las especies *Alnus jorullensis* y *Quercus sideroxyla* con un 0.07% en abundancia, para dominancia *Quercus sideroxyla* con un 0.01%, mientras que en frecuencia el mayor fue para cuatros especies *Arbutus xalapensis*, *Pinus durangensis*, *Pinus teocote* y *Quercus eduardii* con un porcentaje de 13.89%, las valores más bajos son para dos especies *Alnus jorullensis* y *Quercus sideroxyla* con 1.39% el índice de valor de importancia más alto fue para el *Pinus durangensis* con 31.07% y el menor es *Quercus sideroxyla* con 0.49% (Tabla 7).

**Tabla 7.** Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2800-2900 msnm.

<b>Especie</b>	<b>Abundancia</b>	<b>Dominancia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>IVI</b>
<i>Alnus jorullensis</i>	0.07	0.76	1.39	0.74
<i>Arbutus xalapensis</i>	12.04	10.66	13.89	12.20
<i>Juniperus deppeana</i>	1.50	1.33	9.72	4.19
<i>Pinus ayacahuite</i>	1.64	2.19	11.11	4.98
<i>Pinus cooperi</i>	4.58	4.69	9.72	6.33
<i>Pinus durangensis</i>	40.49	38.84	13.89	31.07
<i>Pinus teocote</i>	13.89	10.19	13.89	12.65
<i>Quercus durifolia</i>	0.14	2.69	2.78	1.87
<i>Quercus eduardii</i>	24.69	28.02	13.89	22.20
<i>Quercus laeta</i>	0.14	0.11	2.78	1.01
<i>Quercus rugosa</i>	0.75	0.51	5.56	2.27
<i>Quercus sideroxyla</i>	0.07	0.01	1.39	0.49
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

En el rango altitudinal 2900 a 3000 msnm la abundancia mayor es para la especie *Pinus teocote* con un valor de 33.76%, mientras que el menor porcentaje fue para las especies *Juniperus deppeana* y *Pinus arizonica* con 0.12%, en dominancia y

frecuencia los valores más altos fueron de 31.72 y 16.39%, respectivamente, para *Pinus teocote*, mientras que los valores mínimos de estos parámetros fueron para la especie *Pinus arizonica* con 0.01% en dominancia y en frecuencia con 1.64%. Por último, el índice de valor de importancia más alto es para la especie *Pinus teocote* con un porcentaje de 27.29%, mientras que el menor fue para *Pinus arizonica* con un 0.59% (Tabla 8).

**Tabla 8.** Parámetros ecológicos del rango altitudinal 2900-3000 msnm.

<b>Especie</b>	<b>Abundancia</b>	<b>Dominancia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>IVI</b>
<i>Arbutus xalapensis</i>	9.13	6.82	16.39	10.78
<i>Juniperus deppeana</i>	0.12	0.04	1.64	0.60
<i>Pinus arizonica</i>	0.12	0.01	1.64	0.59
<i>Pinus ayacahuite</i>	3.47	4.55	13.11	7.04
<i>Pinus cooperi</i>	18.03	13.24	13.11	14.80
<i>Pinus durangensis</i>	12.72	14.58	14.75	14.02
<i>Pinus teocote</i>	33.76	31.72	16.39	27.29
<i>Quercus eduardii</i>	20.12	25.49	14.75	20.12
<i>Quercus syderoxylla</i>	2.54	3.55	8.20	4.76
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

### **Biomasa y contenido de carbono por especie.**

Se estimó la biomasa y el contenido de carbono por especie en el rango altitudinal 2700-2800 msnm, donde se muestra que la especie con mayor biomasa con 47.37 ton/ha y carbono con 23.22 ton/ha es *Pinus cooperi*, la especie con menor biomasa y carbono es *Quercus rugosa* con 0.07 y 0.03 ton/ha, respectivamente (Tabla 9).

**Tabla 9.** Biomasa y contenido de carbono por especie del rango altitudinal 2700-2800 msnm.

<b>Especie</b>	<b>Biomasa Ton/ha</b>	<b>Carbono Ton/ha</b>
<i>Pinus cooperi</i>	47.37	23.22
<i>Pinus durangensis</i>	35.87	18.29
<i>Pinus teocote</i>	22.91	11.68
<i>Quercus eduardii</i>	25.26	11.36
<i>Quercus durifolia</i>	1.09	0.49
<i>Pinus ayacahuite</i>	0.88	0.43
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.52	0.24
<i>Quercus sideroxyla</i>	0.31	0.15
<i>Pinus arizonica</i>	0.21	0.10
<i>Juniperus deppeana</i>	0.11	0.05
<i>Quercus rugosa</i>	0.07	0.03
Total	134.60	66.04

En el rango altitudinal 2800-2900 msnm resulto que la especie con mayor biomasa y contenido de carbono es *Pinus durangensis* con 71.92 y 36.68 ton/ha, respectivamente, la de menor biomasa y carbono es *Quercus sideroxyla* con 0.007 y 0.003 ton/ha, respectivamente (Tabla 10).

**Tabla 10.** Biomasa y contenido de carbono por especie en el rango altitudinal 2800-2900 msnm.

<b>Especie</b>	<b>Biomasa Ton/ha</b>	<b>Carbono Ton/ha</b>
<i>Pinus durangensis</i>	71.92	36.68
<i>Quercus eduardii</i>	39.40	18.08
<i>Pinus teocote</i>	19.94	10.17
<i>Pinus cooperi</i>	11.33	5.55
<i>Quercus durifolia</i>	4.48	2.02
<i>Arbutus xalapensis</i>	3.27	1.44
<i>Pinus ayacahuite</i>	2.13	1.04

<b>Especie</b>	<b>Biomasa Ton/ha</b>	<b>Carbono Ton/ha</b>
<i>Alnus jorullensis</i>	0.82	0.38
<i>Quercus rugosa</i>	0.67	0.31
<i>Quercus laeta</i>	0.26	0.13
<i>Juniperus deppeana</i>	0.17	0.08
<i>Quercus sideroxyla</i>	0.007	0.003
Total	154.40	75.88

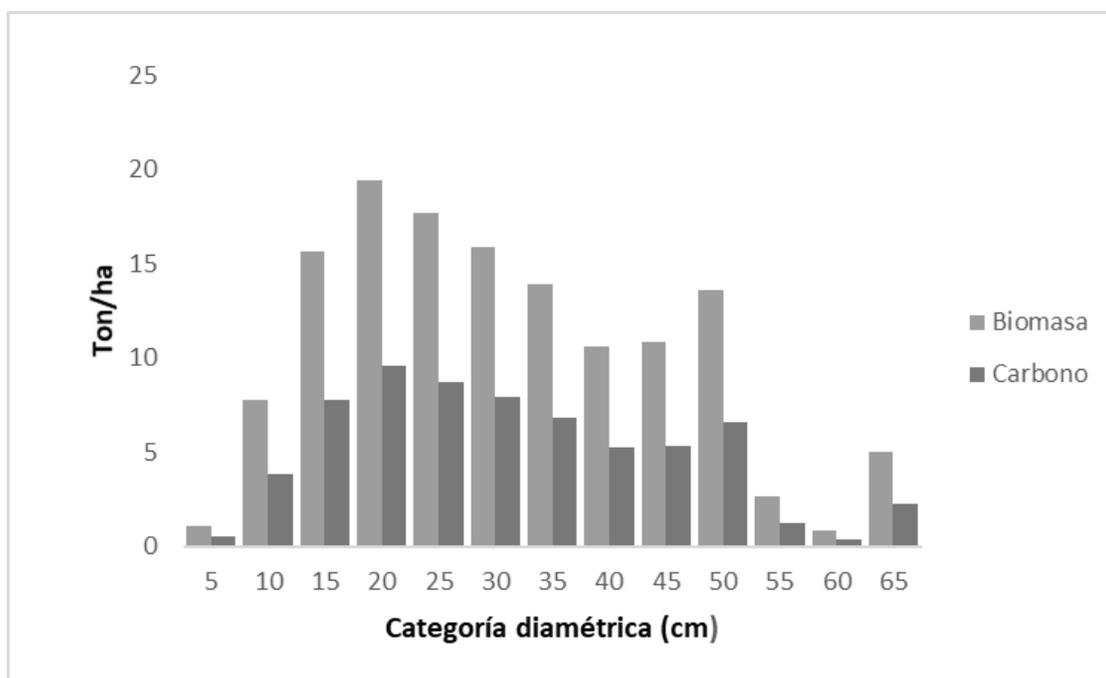
La biomasa y el contenido de carbono por especie en el rango altitudinal 2900-3000 msnm resulto *Pinus teocote* con las cantidades superiores 50.22 y 25.61 ton/ha, respectivamente, la especie con los valores menores es *Juniperus deppeana* con 0.004 y 0.002 ton/ha, respectivamente (Tabla 11).

**Tabla 11.** Biomasa y contenido de carbono por especie 2900-3000 msnm

<b>Especie</b>	<b>Biomasa Ton/ha</b>	<b>Carbono Ton/ha</b>
<i>Pinus teocote</i>	50.22	25.61
<i>Quercus eduardii</i>	38.71	17.42
<i>Pinus cooperi</i>	23.11	11.32
<i>Pinus durangensis</i>	16.79	8.57
<i>Pinus ayacahuite</i>	3.21	1.56
<i>Quercus syderoxla</i>	3.19	1.50
<i>Arbutus xalapensis</i>	1.98	0.87
<i>Pinus arizonica</i>	0.06	0.03
<i>Juniperus deppeana</i>	0.004	0.002
Total	137.27	66.88

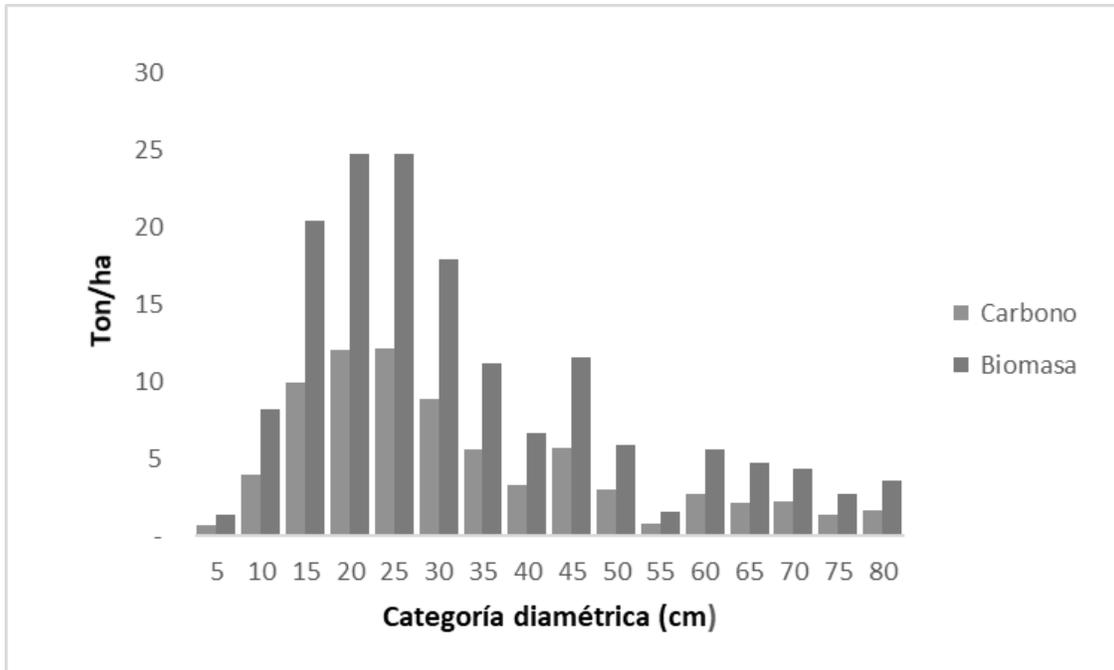
### Biomasa y contenido de carbono por categoría diamétrica.

Se determinó la biomasa y el contenido de carbono por categoría diamétrica en el rango altitudinal 2700-2800 msnm, la categoría diamétrica con las cantidades superiores es la de 20 cm con 19.49 y 9.53 ton/ha, respectivamente, mientras que las inferiores se obtuvieron en 5 cm con 1.05 y 0.52 ton/ha, respectivamente (Figura 5).



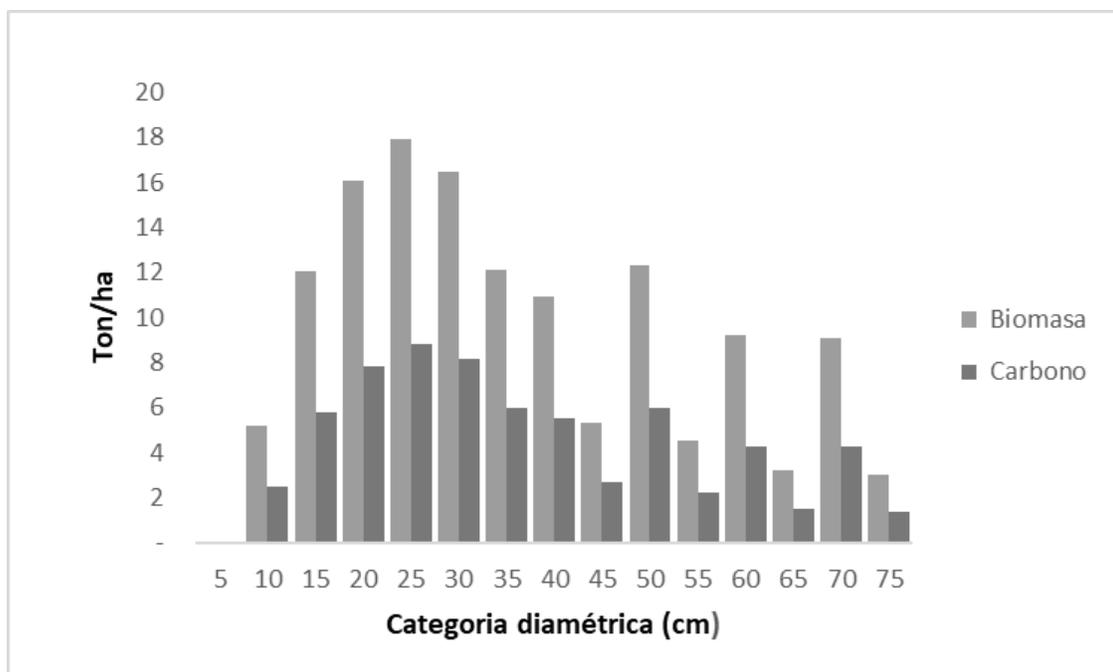
**Figura 5.** Biomasa y contenido de carbono por categoría diamétrica en el rango altitudinal 2700-2800 msnm.

Se estimó la biomasa y el contenido de carbono por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2800-2900 msnm, las que obtuvieron los valores mayores son 20 y 25 cm con 24.75 ton B/ha, 12.01 y 12.15 ton C/ha, respectivamente, mientras que el valor menor resultó en 5 cm con 1.38 y 0.78 ton/ha, respectivamente (Figura 6).



**Figura 6.** Biomasa y contenido de carbono por categoría diamétrica en el rango altitudinal 2800-2900 msnm.

Se evaluó la biomasa y el contenido de carbono por categorías diamétricas en el rango altitudinal 2900-3000 msnm, obteniendo que las categorías con mayor contenido son la de 25 y 30 cm con 17.88 y 16.43 ton B/ha, y 8.81 y 8.17 ton C/ha, respectivamente, mientras que la de menor contenido es 5 cm con 0.07 y 0.04 ton/ha, respectivamente (Figura 7).



**Figura 7.** Biomasa y contenido de carbono por categoría dimétrica en el rango altitudinal 2900-3000 msnm.

### Biomasa y contenido de carbono por rango altitudinal.

El rango altitudinal con mayor cantidad de biomasa y carbono es 2800-2900 msnm con  $154.40 \pm 49.48$  y  $75.88 \pm 24.13$  ton/ha respectivamente, el rango que contiene menos biomasa y carbono es el de menor altitud 2700-2800 msnm con  $134.60 \pm 44.77$  y  $66.04 \pm 22.74$  ton/ha, respectivamente. (Tabla 12). Con el análisis de varianza se determinó que no existen diferencias significativas entre los contenidos de carbono de los gradientes altitudinales ( $P= 0.52788$ ).

**Tabla 12.** Biomasa y contenido de carbono por rango altitudinal.

Rango altitudinal msnm	Biomasa Ton/ha Media $\pm$ SD*	Carbono Ton/ha Media $\pm$ SD*
2700-2800	134.60 $\pm$ 44.77	66.04 $\pm$ 22.74
2800-2900	154.40 $\pm$ 49.48	75.88 $\pm$ 24.13
2900-3000	137.27 $\pm$ 33.22	66.88 $\pm$ 16.26

\*SD: desviación estándar

## DISCUSIÓN

En este estudio realizado en la Sierra Madre Occidental al sur del estado de Durango se registraron 14 especies forestales, mientras que en otro estudio realizado por Díaz (2012) en la sierra de Aguascalientes reporta 50 especies, resultando una riqueza vegetal mayor en comparación con la región de montaña evaluada.

En los rangos altitudinales muestreados las especies forestales con mayor abundancia fueron del género *Pinus*, mientras que Díaz (2012) cita a *Quercus potosina* y *Juniperus deppeana* como las especies, con el índice de abundancia más alto. Las poblaciones de *Pinus* spp. tienden a distribuirse en altitudes superiores a los 2,400 m, sin embargo, específicamente *Pinus leiophylla* se limita a un rango de 2,400-2600 y en exposiciones orientadas al Norte, donde existe un balance hídrico más favorable (Sáenz-Romero et al., 2003).

La biomasa mayor en este estudio se registró en el rango altitudinal 2800-2900 msnm con un valor de 154.40 ton/ha, en el trabajo realizado por Alvarez et al. (2010) demostraron que el contenido de biomasa arbórea denotó un patrón complejo con respecto a la altitud: el valor máximo se registró a 2500 msnm, representó casi el doble (1.8 veces) de lo encontrado en 1950 y 2400 msnm y 1.2 veces el valor a 1500 msnm. Las diferencias en los resultados por altitud se relacionan con la estructura y composición florística de las comunidades vegetales descritas por Meave et al. (2006) y por Álvarez (2010), que apoyan lo descrito por Brown y Lugo (1982) y Clark y Clark (1996), quienes indican que la presencia de árboles con DAP > 70 cm en bosques incrementa considerablemente los contenidos de biomasa para estos. Cueva et al. (2019) documentan que los resultados que obtuvieron en su investigación en el bosque seco andino evidenciaron que la cantidad de biomasa aumentó conforme aumentó la altitud. Estos resultados difieren con los estudios de biomasa aérea en transectos de elevación tropical en Ecuador (Girardin et al., 2014) que sugieren que la biomasa disminuye a medida que aumenta la elevación, el incremento de la biomasa, en la zona alta se debe a la dominancia (área basal) de las especies, también, a que esta área está influenciada por la cordillera de Los Andes, la cual presenta condiciones edáficas, topográficas y climáticas que influyen en la tasa de rendimiento, y dependiendo de la

capacidad de respuesta que presentan las especies (Cuesta et al., 2009), tendrá efecto en la biomasa. Comparando las reservas de biomasa del bosque seco andino de los árboles vivos con  $DAP \geq 10$  cm y las de este estudio, resulta que las reservas de biomasa se encuentran por debajo del rango sugerido por el IPCC (2006) que ronda entre 200 y 410  $Mg\ ha^{-1}$ , pero se asemeja a bosques secos secundarios jóvenes de Costa Rica que almacenan 102.2  $Mg\ ha^{-1}$  (Cifuentes-Jara, 2008).

En la altitud 2900-3000 la especie con el porcentaje superior de índice de valor de importancia fue la que obtuvo también la biomasa mayor *Pinus teocote* con 50.22 ton/ha. Granados-Victorino et al. (2017) al analizar la acumulación de biomasa por especies, evidencian que las especies que acumulan la mayor cantidad de biomasa son aquellas que tienen un alto valor de importancia. Estos resultados coinciden con los estudios de biomasa realizados por Chave et al. (2005) y Álvarez et al. (2010) en bosques secos tropicales, que demuestran una alta relación entre la acumulación de biomasa y el valor de importancia de las especies.

El contenido de carbono superior fue en la altitud de 2800-2900 msnm con 75.88 ton/ha mientras que Alvares et al. (2010) documentan que el promedio para el almacén total del bosque montano de niebla en altitudes de 1500 a 2500 msnm, es de 138.3  $Mg\ C\ ha^{-1}$ , valor superior a los obtenidos en este estudio, de igual forma al reportado por De Jong (1999) que fue 468  $Mg\ C\ ha^{-1}$  para bosques montanos de Chiapas, pero similar al registrado por Acosta et al. (2001) para bosques de liquidámbar en la región mazateca de Oaxaca. En otras investigaciones (Grubb, 1977, Bruijnzeel y Veneklaas, 1998, Bubb et al., 2004) se constató que la capacidad de las comunidades forestales para almacenar C en sus diferentes componentes varía dentro del intervalo de altitud, a 1500 msnm donde la comunidad forestal corresponde a un bosque montano bajo en el que los dos principales almacenes de C (biomasa y suelo) son elevados y se encuentran en proporciones similares, entre 1950 y 2400 msnm coincide con la mayor condensación de nubes y hay una reducción notable en el diámetro y altura del arbolado, lo cual implica una disminución directa en el almacén de C en la biomasa.

La especie con mayor contenido de carbono es *Pinus durangensis* en la altitud 2800-2900 con 36.68 ton/ha, Galeana (2008) reporta un valor similar al de este estudio de 37.40 MgC\*ha<sup>-1</sup> en la cuenca del Río Magdalena en un bosque abierto.

## CONCLUSIONES

El mayor número de individuos en los tres rangos altitudinales se presentó en las categorías diamétricas menores de 10 cm hasta los 20 cm. El número menor de categorías diamétricas resultó en el rango altitudinal 2700 a 2800 msnm con 13 (5 - 65 cm), seguido por 15 (5 - 75 cm) en el rango 2900-3000 msnm y el mayor con 16 categorías (5 - 80 cm) en 2800 a 2900 msnm.

Se registró en el rango altitudinal de 2700-2800 msnm un total de 11 especies, en el rango de 2800-2900 msnm la mayor cantidad de especies con 12, mientras que en el rango superior de 2900-3000 msnm nueve especies. La especie más representativa y de mayor importancia ecológica según los parámetros evaluados para los rangos de 2700-2800 y 2800-2900 msnm es *Pinus durangensis* y para el rango 2900-3000 msnm es *Pinus teocote*.

El género *Pinus* obtuvo los más altos niveles de contenido de biomasa y carbono en los tres rangos altitudinales, siendo *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Pinus teocote* las especies de mayor contribución. Las categorías diamétricas que contienen más biomasa y carbono son 20, 25 y 30 cm en los tres rangos altitudinales.

En el análisis estadístico de las medias del contenido de carbono almacenado en los gradientes altitudinales, no resultaron diferencias estadísticas, por lo cual se acepta la hipótesis alternativa. Las estimaciones de biomasa y carbono almacenado en las áreas de estudio mostraron que la mayor cantidad se encuentra en el rango altitudinal de 2800-2900 msnm seguido por el rango 2900-3000 msnm y posteriormente el de 2700-2800 msnm.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F. y Díaz-Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. Cham. Terra Latinoamericana, 27(2): 105–114.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311834003>
- Avalos, G. M. (2004). Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, PICC. In: Martínez, J. y A. Fernández (Coord.). Cambio Climático una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México. pp. 123-142.
- Álvarez, G., García, N., Krasilnikov, P. y García, F. (2010). Evaluación de la captura y estabilidad del carbono en un ecosistema de bosque mesófilo de montaña a lo largo del gradiente altitudinal en la Sierra Norte de Oaxaca. (Tesis de doctorado). Facultad de Ciencias. UNAM. 127 p.
- Avendaño, D., Acosta, M., Carrillo, F. y Etchevers, J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. Fitotecnia Mexicana, 32(3), 233–238.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61011739008>.
- Aguilar-Hernández, L., García-Martínez, R., Gómez-Mirafior, A. y Martínez-Gómez, O. (2016). Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). In IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. 529-530.
- Alberto, D. M. y Elvir, J. A. (2005). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales de Cabañas, La Paz. Tatascán. 17(2), 1-12.
- Álvarez, A. G. (2010). Evaluación de la captura y estabilidad del carbono en un ecosistema de bosque mesófilo de montaña a lo largo del gradiente altitudinal en la Sierra Norte de Oaxaca. (Tesis de doctorado). Facultad de Ciencias. UNAM. 127 p.

- Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W. and Levanic, T. (2013). Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography*. 22:706-717.
- Berger, A. (2002). The Effect of Greenhouse Gases on Climate. Proceedings of the Conference on the Future Energy Systems and Technology for CO2 Abatement, Antwerp, 61 Belgium, 3-10.
- Bird, L. y Molinelli J. (2008). "El Calentamiento Global y Sus Consecuencias". Alianza Geográfica.
- Bortolot, Z. y Wynne, R. H. (2005). Estimating Forest biomass using small footprint LiDAR data: an individual treebased approach that incorporates training data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6), 342-360.
- Bortolot, Z. J. (2006), Using tree clusters to derive forest properties from small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(12), 1389-1397.
- Bubb, P., I. May., Miles, L. and Sayer, J. (2004). Cloud forest agenda report. UNEP WCMC, Cambridge. UK. 36 p.
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M. and Kauppi, P. (1996). Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. pp: 773–797 In R. T. Watson, M. C. Zinyowera, and R. H. Moss, editors. *Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific technical analyses*.
- Brown, S. (1996). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. XII Congreso Mundial Forestal, Antalya Turquía. 107-121.
- Brown, S. y Lugo, A. F. (1982). The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*. 14:161-187.
- Brown, S., Gillespe, A. J. R. and Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4):881-902.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2015). Ley general de cambio climático, México, en Diario Oficial de la Federación, Secretaría General, 13 de mayo de 2015. Consultado en <[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_130515.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130515.pdf)

Castaño, J. and Bravo, F. (2012). Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in the Cantabrian Range (NW Spain). *Annals of Forest Science*. 69:663–672 <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-012-0183-6>.

Carrillo, F., Buendía-Rodríguez, E. M. Acosta-Mireles, T. Hernández-Tejeda. (2008). Captura de Carbono en Áreas Arboladas. *In*: Guerra de la C., V y C. Mallén R. (Comp.). Tlaxcala sus recursos forestales: conservación, aprovechamiento y bases para su manejo. INIFAP/CENID COMEF.CONACYT. México, D. F. México. Libro Técnico Num. 4. pp. 170-180.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). Manual de procedimientos para el muestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Re-muestreo 2011. Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 140 p.

Congreso del Estado de Baja California. (2015). Ley de Prevención, Mitigación y Adaptación del Cambio Climático para el Estado de Baja California, Mexicali, Baja California, en Periódico Oficial Núm. 25, Tomo CXIX, 27 de marzo de 2015, pp. 19. Consultado en <[http://www.congresobc.gob.mx/legislacion/Parlamentarias/TomosPDF/Leyes/TOMO\\_VII/Leycamclim-2\\_27MAR2015.pdf](http://www.congresobc.gob.mx/legislacion/Parlamentarias/TomosPDF/Leyes/TOMO_VII/Leycamclim-2_27MAR2015.pdf)>, consultado el 08 de Septiembre del 2021.

Colonna, P. (2010). La Química Verde. Zaragoza, España: ACRIBIA S.A

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2006). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático- Manual, Dependencia de Asuntos Intergubernamentales y Jurídicos de la

Secretaría del Cambio Climático, Alemania. Consultado en:  
[http://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook\\_esp.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook_esp.pdf)

Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMART), Instituto Nacional De Ecología y Cambio Climático (INECC). (2013). “Estrategia Nacional de Cambio Climático: Visión 10-20-40”, Gobierno de la República, México, D.F. pp.60.

Cielsa, W. (2011). Cambio Climático Bosques y Ordenación Forestal Una Visión de Conjunto FAO Montes. Roma, Italia: Estudio FAO Montes. 126 p.

Cifuentes-Jara, M. (2008). Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in tropical secondary forests growing in six life zones of Costa Rica. Dissertation Doctor of Philosophy. Corvallis, United States of America. Faculty in the Environmental Sciences Graduate Program, Oregon State University. 195 p.

Cuesta, F., Peralvo, M. y Valarezo, N. (2009). Los bosques montanos de los Andes Tropicales. Quito, Ecuador. ECOBONA. 73 p.

Cueva, E., Lozano, D. y Yaguana, C. (2019). Efecto de la gradiente altitudinal sobre la composición florística, estructura y biomasa arbórea del bosque seco andino, Loja, Ecuador. Bosque, 40(3):365-378. DOI: 10.4067/S0717-92002019000300365.

Cuatecontzi, D.H. y Gasca, J. (2004). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico. *In*: Martinez, J. y A. Fernandez (Coord.). Cambio Climatico una vision desde Mexico. Instituto Nacional de Ecologia. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexico, D.F. Mexico. pp. 87-98.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145: 87-99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>

- Chen, W. Y. (2015). The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: A nationwide estimate. *Cities*, 44, 112-120.
- Christen, N.C., Coops, B.R., Crawford, R., Kellett, K.N., Liss, I., Olchovski, T.R., Tooke, M. van der Laan y Voogt, J.A. (2011). Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. *Atmospheric Environment*, 45(33), 6057–6069.
- Chojnacky, D. C., Heath, L. S. & Jenkins, J.C. (2013). Updated generalized biomass equations for North American trespecies. *Forestry*. 87:129–151. doi: 10.1093/forestry/cpt053
- Choné, T., Andreux, F., Correa, J.C., Volkoff, B. and Cerri, C.C. (1991). Changes in organic matter in an oxisol from the Central Amazonian Forest during eight years as pasture determined by <sup>13</sup>C isotopic composition. In Berthelin, J. ed. *Diversity of environmental biogeochemistry*. Elsevier, Amsterdam. Pp: 397-405.
- Clark, D. B. and Clark, D. A. (1996). Abundance, growth and mortality of very large trees in neotropical lowland rain forests. *For. Ecol. Manage.* 80:235-244.
- Dávalos-Sotelo, R., Rodrigues-Morato, M. & Martínez-Pinillos, E. (2008). Almacenamiento de Carbono. En I. (. A.C.), R. Manson, V. Hernández Ortiz, S. Gallina, & K. Mehltreter (Edits.), *Agrosistemas Cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad Manejo y Conservación* (págs. 223-234). México DF., México: INE-SEMARNAT.
- Díaz, B. L. y Romero, C. (2004). La captura de carbono y la gestión forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid. *Monografías INIA: Serie Forestal*, (9), 79.
- Díaz, V., Sosa, J. y Pérez, S. (2012). Distribución y abundancia de las especies arbóreas y arbustivas en la Sierra fría, Aguascalientes, México. pp. 99-126
- Emanuelli, P., Duarte, E., Milla, F., Orellana, O. & López, S. (2017). Propuesta Metodológica para la Validación de la Cobertura y Uso de la Tierra Mediante la

- Elaboración de un Inventario Multipropósito de Recursos Vegetacionales y Levantamiento de Puntos de Control Mediante Visitas en Terreno. El Salvador. 53 p.
- Energy Information Administration (EIA), Annual Energy Outlook. (2004). "Emisiones a la atmósfera"
- Escobedo, F., Sebastian V., Min Z., John E., Wagner y Wayne Z. (2010). Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. *Environmental Science & Policy*, 13(5): 362-372.
- FAO. (2009). Informes sobre recursos mundiales de suelos. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. pp17-61. Consultado en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr96s.pdf>. Diciembre 2015.
- Figuroa, M. E. y Redondo, S. (2007). Los sumideros naturales de CO<sup>2</sup>. Muños Moya Editores Extremeños. Universidad de Sevilla España. pp: 20-61
- García, I. E. (2011). Estimación del contenido y captura potencial de carbono del bosque de *Pinus hartwegii* Lidl. *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura, UNAM, D.F. 73 pp.
- Galeana, P. M. (2008). Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de Licenciatura. UNAM. DF. 74p.
- Gómez-Echeverri, L. (2000). Cambio climático y desarrollo. San José, CR, PNUD-Yale School of Forestry and Environmental Studies. 465 p.
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., Meléndez-Soto, A. y Solís-Moreno, R. (2015). Variación espacial y temporal del contenido de carbono en bosques de la sierra madre occidental: avances preliminares. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 2(3):368-372.
- Girardin, C., Farfan-Rios, W., Garcia, K., Feeley, K. J., Jørgensen, P. M., Murakami, A., Cayola Pérez, L., Seidel, R., Paniagua, N., Fuentes Claros, A. F.,

- Maldonado, C., Silman, M., Salinas, N., Reynel, C., Neill, D. A., Serrano, M., Caballero, C. J., Cuadros, M. A., Macía, M. J., Killeen, T. J. y Malhi, Y. (2014). Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network of six Andean elevation transects. *Plant Ecology & Diversity*, 7: 161-171. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.820806>
- Granados-Victorino, R. L., Sánchez-González, A., Martínez-Cabrera, D. y Octavio-Aguilar, P. (2017). Estructura y composición arbórea de tres estadios sucesionales de selva mediana subperennifolia del municipio de Huautla, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88: 122-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.024>
- Grubb, P. J. (1977). Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. *Ann. Rev. Ecol. and Systematics*, 8: 83-107.
- Hall, S. A., Burke, I. C., Box, D. O., Kaufmann, M. R., y Stoker, J. R. (2005). Estimating stand structure using discrete return lidar: an example for low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 208(1-3), 189-209.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M. and Turubanova S. A. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. 342:850–853.
- Honorio, E. N. y Baker, T. R. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana/ Universidad de Leeds. Lima, 54 p.
- Hyun-Kil, J. (2002). Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 64(2): 115-126.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Technical summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Fifth Assessment Report, WG1 AR5. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2002). Cambio climático y biodiversidad. Documento V del IPCC. Gitay, H., A. Suárez, R.T. Watson, D.J. Dokken (Eds.). PNUMA. 85 p.
- INECC. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. Consultado en: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/inventario-nacional-de-emisiones-degases-de-efecto-invernadero-con-cifras-1990-2010>
- Jochem, A., Hollaus, M., Rutzinger, M., Höfle, B., Schadauer, K., y Maier, B. (2010). *Estimation of aboveground biomass using airborne LiDAR data*. Department of Forest Inventory at the Federal Research and Training Center for Forests, Natural Hazards and Landscape, Vienna, Austria, 9 p.
- Johnson, A., and Gerhold, D. (2003). Carbon storage by urban tree cultivars, in roots and above ground. *Urban Forestry y Urban Greening*, Elsevier, 2(2): 65-72.
- Kaya, Y. (2002). A Strategy for Mitigating Global Warming. Proceedings of the Conference on the Future Energy Systems and Technology for CO2 Abatement. Antwerp, Belgium, 8:19-25.
- Kenton, R., Keith, S., Jessica, G. y Kieron, D. (2015). "Valuing London's Urban forest- Result of the London i-tree Eco Project", i-tree, Treeconomics London, pp.83. Consultado en: [https://www.itreetools.org/resources/reports/Valuing\\_Londons\\_Urban\\_Forest.pdf](https://www.itreetools.org/resources/reports/Valuing_Londons_Urban_Forest.pdf).
- Lashof, D. A. and Ahuja, D. R. (1990). Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*. 344(5): 529-531.
- Ludevid, A. M. (2010). El cambio global en el medio ambiente: Introducción a sus causas humanas. 2a edición. Alfa omega. México, Distrito Federal. Pp: 19-24.

- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G. y Shugart, H. H. (1999). Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67(1), 83-98.
- Ledley, Tamara, S., Sundquist, E. T., Schwartz, S. E., Hall, D. K., Fellows, J. D., and Killeen, T. L. (1999). Climate Change and Greenhouse Gases. *EOS*, 80(39): 453.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G., y Shugart, H. H. (1999). Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67(1), 83-98.
- Macchioni, F., Cioni, P. L., Flamini, G., Morelli, I., Maccioni, S. y Ansaldi, M. (2009). Chemical composition of essential oils from needles, branches and cones of *Pinus pinea*, *P. halepensis*, *P. pinaster* and *P. nigra* from central Italy. *Flavour and Fragrance Journal*, 18, 139–143.
- Matthews, B. (1996). "Climate Engineering: A Critical Review of Proposals, Their Scientific and Political Context, and Possible Impacts." Compiled for Scientists for Global Responsibility, November. Choose Climate.
- Masera, O. (1995). Carbon mitigation scenarios for Mexican forest: Methodological considerations and results. *Interciencia*. 20(6): 388-395.
- Meave, A., Rincón, A. and Romero-Romero, M. A. (2006). Oak forests of the hyper-humid region of La Chinantla, Northern Oaxaca range, México. *In*: Kappelle, M. (ed). *Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak Forests*. Ecological Studies 185. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 113-125.
- Matthews, B. (1996). "Climate Engineering: A Critical Review of Proposals, Their Scientific and Political Context, and Possible Impacts." Compiled for Scientists for Global Responsibility, November. Choose Climate.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: IPCC. Cambridge University Press.

- Metz, B., Davidson, O., Swart, R. and Pan, J. (2001). Climate change (2001). Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MINAM (Ministerio de Ambiente) (2009). Identificación de Metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales. Segunda Comunicación Nacional del Perú a la CMNUCC. Mayo- Lima. 99 p.
- Mintzer, I. (1992). Emission Scenarios Forthe IPCC-AN Update: Background Documentation on Asumptions. Methodology, and results. US EPA. Washington D. C.
- Nájera, L. y Hernández, H. (2009). Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra Ximhai*. 52(2):225-230.
- Morrissey, W. A. and Justus, J. R. (1997). "Global Climate Change." Cambridge Scientific Abstracts.
- MDL. (2008). Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. (Z. Salinas, & P. Hernández, Edits.) Turrialba, Costa Rica: Masterlitho S.A.
- McHale, I. C., Burke, M. A., Lefsky, P. J. y Gregory, M. (2009). Urban forest biomass estimate: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees?. *Urban Ecosystem*, 12, 95-113.
- McPherson, G. E. (1998). Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 24(4): 215-223. Consultado en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.155.764&rep=rep1&type=pdf>,
- McPherson, G. E., Qingfu, X. y Aguaron, E. (2013). A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 120, 70-84.

- Návar, J., Méndez, E., Graciano, J., D. V. and Parresol, B. (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments*. 59:657-674.
- Nogués, F., García, D., y Rezeau, A. (2010). *Energías de la Biomasa* (Primera ed., Vol. Dos). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Nowak, D. y Crane, D. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the United State American. *Environmental Pollution*, 116, 381–389.
- Nowak, D. J., Allison, R., Bodine, R. E., Hoehn, III., Christopher, E., Edgar, B., Dudley, R., Hartel, R., Tonya, W. L. y Thomas, J. B. (2016). *Austin's Urban Forest, 2014*. U.S. Forest Service. Consultado en: [https://www.itreetools.org/resources/reports/Austins\\_Urban\\_Forest\\_report.pdf](https://www.itreetools.org/resources/reports/Austins_Urban_Forest_report.pdf)
- OMM. (2018). Boletín de la OMM sobre los Gases de Efecto Invernadero N°14: Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2017. Consultado en: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5463](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5463)
- Ordóñez, J. A. B. (1999). Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, México, D.F. Junio. 72 p.
- Ordóñez, J. A. B. y Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 7(1):3-12.
- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. 253 p.
- Popescu, S. C. (2007). Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass & Bioenergy*, 32, 646-655.
- Popescu, S., Wynne, R., y Nelson, R. (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 564–577.

- Pompa-García, M., Solís, R., Chacon, J., Martínez, M., Valdez, R.A., & Cháidez, J.D. (2014). Variación del contenido de carbono en compartimentos de *Arbutus bicolor*. Handbook T-II, ECORFAN. pp. 209-2015
- Pompa-García, M. y Yamalliel, Y. (2014). Concentración de Carbono en *Pinus cembroides* Zucc: Fuente Potencial de Mitigación del Calentamiento Global. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 04(14): 1-7.
- Pimienta, T., Domínguez, G., Aguirre, O., Hernández, F. J. y Jiménez, J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. Madera y Bosques. 13(1):35-46.
- Pimienta-de la Torre, J., Reyes-Reyes, J., Rodríguez-Morales, J. y Marroquín-Morales, P. (2019). Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. Avances en investigación Agropecuaria. 23(2): 31-41. Consultado en: <http://ww.ucol.mx/revaia/pdf/2019/mayo/4.pdf>
- Pimienta, D. J., Domínguez, C. G., Aguirre, C. O., Hernández, F. J. y Jiménez, P. J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco en Pueblo Nuevo, Durango. Madera y Bosques, 13(1): 35-46.
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirre, O., & Treviño, E. (2006). Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. CIENCIA UANL, 9(2), 1-10.
- Roncal-García, S., Soto-Pinto, L., Castellanos-Albores, J., Ramírez-Marcial, N. y De Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. Interciencia. 33(3): 200-206.
- Romahn, C. F. & Ramírez, H. (2010). *Dendrometría*. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. 294 p.
- Rubin, Edward S., Cooper, Richard N., Frosch, Robert A., Lee, Thomas H., Marland, Gregg, Rosenfeld, Arthur H., and Stine Deborah D. (1992). Realistic Mitigation Options for Global Warming. Science, 257: 148-49, 261-66.

- Saénez-Romero, C., Snively, A. E. y Lindig-Cisneros, R. (2003). Conservation and restoration of pine forest genetic resources in Mexico. *Silvae Genetica*, 52: 233-237.
- Sánchez, H. (2008). Código de Derecho Internacional Ambiental. Primera Edición. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad del Rosario.
- Segura, M. y Andrade, H. (2008). Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas*, 46, 1-8.
- Solano, M., Ramón, P., Gusmán, E., Burneo, J. I., Quichimbo, P. y Jiménez, L. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas de carbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Revista científica de Ecología y Medio Ambiente*. 27(3):116-122. Doi.: 10.7818/ECOS.1521.
- Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. (2001). Manual de procedimiento para inventarios de carbono en ecosistemas forestales, Universidad Austral de Chile-proyecto FONDEF. Recuperado de: <http://www.ccmss.org.mx/paises/chile/>
- Smith, R. L. y Smith, T. M. (2004). *Ecología*. 4a edición. Pearson educación. Pp: 390.
- Stoffberg, G. H., Rooyen, V.M., Van der Linde, M.J. and Groeneveld, H.T. (2010). Carbon sequestration estimates of indigenous street in the City of Tshwane, South Africa. *Urban Forest and urban greening*, 9(1), 9-14.
- Tang, Y., Anping, C. y Shuqing, Z. (2016). Carbon Storage and Sequestration of Urban Street Trees in Beijing, China. *Frontier, Ecology and Evolution*, 4(53): 1-8.
- Torres, J. M. y Guevara, A. (2007). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico, Instituto Nacional de Ecología y SEMARNAT, México. Consultado en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/63/cap3.html>
- Tipper, R. and B. De Jong. (1998). Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: Comparison of alternative methodologies, with special inference to Chiapas, México. *Commonwealth Forestry Review*. 11(3):219-228.

- García, U. y Humberto, J. (2015), Miguel Ángel de Quevedo y el proyecto de conservación hidrológica forestal de las cuencas nacionales de la primera mitad del siglo XX, 1900-1940. *Historia Caribe*, 10(26), 211-255.
- Vaccari, F. P., Beniamini, G., Toscano, P. y Perrone, C. (2013). Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. *Land Scape y Urban Planning*, 120, 138–146.
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas., J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón. C. G. and Álvarez-González. J. G. (2017). Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8. 269; doi:10.3390/f8080269.
- Valentin, L., Kluczek-Turpeinen, B., Willfor, S., Hemming, J., Hatakka, A., Steffen, K. y Tuomela, M. (2009). Scots pine (*Pinus sylvestris*) bark composition and degradation by fungi: Potential substrate for bioremediation. *Bioresources Technology*, 101, 2203–2209.
- Velasco, E., Matthias, R., Norford, L. y Molina, L. T. (2016). Does urban vegetation enhance carbon sequestration?. *Landscape and Urban Planning*, 148, 99-107.
- Vega, L. E. (2009). Valor de las áreas naturales protegidas como sumideros de carbono para la mitigación del cambio climático. In: C. Bezaury. *El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos* (pp. 18-19). México: The nature conservancy-CONANP.
- Weissert, L. F., Salmond, J. A., y Schwendenmann, L. (2014). A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO 2 emissions. *Urban Climate*, 8, 100-125.
- Wang, W. y Pataki, D. (2010). Spatial patterns of plant isotope tracers in the Los Angeles urban region. *Landscape Ecology*, 25, 35-52.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J. y Zhenyuan, S. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry and Urban Greening*, 3(2), 65–78.

- Yajie, D., Beicheng, X. y Weidong, C. (2014). Carbon footprint of urban areas: An analysis based on emission sources account model. *Environmental Science and Policy*, 44, 181-189.
- Yerena, Y. J. I., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. y Treviño, G. E. J. (2011). Concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 283–291.
- Yerena-Yamallel, J.I., Jimenez-Perez, J., Aguirre-Calderon, O.A., Treviño-Garza, E.J. y Alanis-Rodriguez, E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 13(3):49-56.
- Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C. & Chave, J. (2009). Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*. 12:351-366. DOI: <https://doi.org/10.5061/dryad.234>.
- Zhang, Q., Wang, C., Wang, X. and Quan, X. (2009). Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecology Management*. 258(5):722–72.