



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

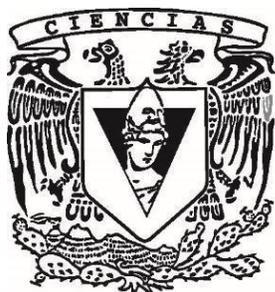
**ESTIMACIÓN DE CONTENIDO Y
CAPTURA POTENCIAL DE CARBONO
EN EL PARQUE NACIONAL
ECOTURÍSTICO EL TEPOZÁN,
ALCALDÍA TLALPAN, CIUDAD DE
MÉXICO, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGO

PRESENTA
SERGIO ALBERTO CASTILLO PALOMARES

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ANTONIO BENJAMÍN ORDÓÑEZ DÍAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD MX, 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE CIENCIAS
Secretaría General
División de Estudios Profesionales

Votos Aprobatorios

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
Directora General
Dirección General de Administración Escolar
Presente

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

**Estimación de contenido y captura potencial de carbono en el Parque Nacional
Ecoturístico el Tepozán, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, México**

realizado por **Sergio Alberto Castillo Palomares** con número de cuenta **308047279** quien ha decidido titularse mediante la opción de tesis en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

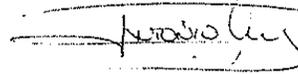
Propietaria Dra. María Cecilia del Carmen Nieto de Pascual Pola



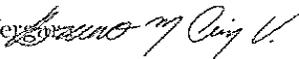
Propietaria Dra. Nadia Silvana Santini González



Propietario Tutor Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz



Suplente Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara



Suplente M. en C. Carlos Mallén Rivera



Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., A 18 DE FEBRERO DE 2021

JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

1. Datos del alumno

Castillo
Palomares
Sergio Alberto
Tel. número: 55 1630 6980
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
308047279

2. Datos del tutor

Dr.
Ordóñez
Díaz
José Antonio Benjamín

3. Presidente

Dra.
Nieto de Pascual
Pola
Cecilia del Carmen

4. Vocal

Dra.
Santini
González
Nadia Silvana

5. Secretario

Dr.
Ordóñez
Díaz
José Antonio Benjamín

Suplente 1

Dr.
Chávez
Vergara
Bruno Manuel

Suplente 2

M. en C.
Mallén
Rivera
Carlos

7. Datos de la tesis

Estimación de contenido y captura potencial de carbono en el Parque Nacional Ecoturístico el Tepozán, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, México.
70 p. 2022.

DEDICATORIA

A la vida en el planeta y su diversidad; tristemente en la actualidad la humanidad está causando daños irreparables que atentan contra millones de años de evolución, e incluso contra todo sentido común, la humanidad pone en jaque su propia continuidad. Solamente mediante acciones inmediatas y a nivel global se pueden reparar parte de los daños, y aunque jamás se podrá recuperar lo perdido... aún es posible lograr una conciliación armoniosa entre la naturaleza y la sociedad.

A las comunidades indígenas de México y el mundo; a los pueblos originarios, y a la gente que escucha y sabe escuchar al planeta, a su dolor, y hace algo al respecto. Confío y sé que algunas de sus prácticas y cosmovisiones pueden ayudar a entender a la naturaleza desde una perspectiva más amplia... una donde se aprecia y se respeta a la vida, donde la humanidad no ocupa una posición de control y dominio sobre sus semejantes; más bien, una perspectiva de responsabilidad de nuestra propia existencia, con todo lo que implica, y de ser el caso, esa responsabilidad se extiende hacia la naturaleza y la vida misma.

A mi padre Sergio Alberto Castillo Sánchez y a mi madre Ma. Guadalupe Palomares Baeza †; ya que han sido un incondicional para mí y me han apoyado más de lo que creí necesitar, infinitas gracias, les amo y admiro. A mis abuelas María del Carmen de Jesús Sánchez Santín y María de los Ángeles Baeza Gaytán †, y a mis abuelos Rigoberto Palomares Mejía † y Sergio Castillo Aguilar †. Ya que, a pesar de las contradicciones del siglo XX, con arduo esfuerzo, lograron salir adelante lo mejor que pudieron, creando las condiciones, sin saberlo, de que yo pudiera tener estudios. Gracias a los seis por su ejemplo de trabajo, respeto, fortaleza, voluntad y amor. Siempre incansables y con disposición.

A Mariana Lira Peralta (Pollis); que me brindo su apoyo en este proceso. A través de su ejemplo aumento mi inspiración en construir un mundo donde quepan muchos mundos. Gracias por dejarte conocer y por caminar conmigo estos años, avivando dentro de mí ese poderoso fuego de curiosidad e ímpetu. Te amo hoy, ayer, mañana y siempre.

A la comunidad UNAM que me ha dado tanto. Desde el CCH Sur mi vida dio un giro maravilloso, pude adquirir conocimientos, que sabía, estaban al alcance de pocas personas y entendí que esos conocimientos deben ponerse al servicio de la mayoría. Y, al tiempo en que forjaba mi personalidad, necesariamente interioricé una curiosidad acompañada de un pensamiento crítico que guio mi aprendizaje muy satisfactoriamente.

Tal vez en algún momento nos toque vivir alguna utopía en la cual la humanidad pueda vivir en equilibrio consigo misma y con el ambiente, aún no es tarde para regresar por los pasos del sinuoso camino del mal llamado "progreso". ¡Porque seguimos aquí... viviendo, respirando, amando, durmiendo menos y soñando más! ¡Qué tal que se me olvida que estoy durmiendo y sueño viviendo!

AGRADECIMIENTOS

En la culminación de este ciclo le agradezco principalmente a mi tutor, maestro y amigo, al Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz y a la comunidad que ha construido. Bajo los principios de la colaboración y el trabajo en equipo en busca del beneficio común, gracias por abrirme las puertas con cariño, respeto y confianza, Su paciencia y virtud en la docencia sin duda ha inspirado a varias generaciones de estudiantes.

A mis sinodales: Dra. María Cecilia del Carmen Nieto de Pascual Pola, Dra. Nadia Silvana Santini González, Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz, Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara, M. en C. Carlos Mallén Rivera y al M. en C. Manuel Hernández Quiroz, por su disposición y ayuda en este trabajo.

A la M. en C. Mariana Lira Peralta, por sus acertados comentarios en la revisión general.

Al M. en C. Adolfo Galicia Naranjo por su ayuda en la delimitación del área de estudio, fundamental en el proceso de elaboración de este trabajo.

Aquí van los que nos apoyaron en campo para este trabajo: Biól. Luis Raúl Ahedo Hernández, Dra. Teresa González Ruíz, Dra. María Ivonne Reyes Ortega, Dr. Jorge Escandón Calderón, Dra. Claudia Sheinbaum Pardo. De los mencionados anteriormente, en especial a la Dra. María Ivonne Reyes Ortega y al Dr. Jorge Escandón Calderón por haber tenido el gusto de haber llevado sus cursos de bioestadística y cambio climático en las ciudades.

A Servicios ambientales y Cambio Climático SACC, A.C., con registro Reniecyt 2015/20930, por el apoyo y financiamiento del presente estudio. Al personal en general que participa en este proyecto de formación de recursos humanos.

En particular, a los adjuntos de investigador: Luis Enrique Ortega Treviño y Anabel Munguía Bárcenas por el apoyo en la búsqueda de materiales para el presente estudio, y al M en C. Adolfo Galicia Naranjo por su orientación y apoyo en la construcción de la base de datos y en la obtención de los polígonos de estudio.

Proyecto Papiit IN303817 Huertos familiares y afines en México. Coordinado por: Dra. María Jesús Ordoñez Díaz, CRIM, UNAM.

Índice Temático

Página

Resumen	8
Abstract	8
Capítulo 1 Antecedentes	9
1.1 Contexto	11
Capítulo 2. Introducción	19
2.1 El clima	19
2.1.1 La atmósfera	20
2.1.2 Ciclo global del carbono	22
2.1.3 El efecto invernadero	26
2.2 Cambio climático	30
2.3 Servicios ecosistémicos	31
2.4 Parámetros utilizados	33
2.5 Justificación	35
Capítulo 3. Objetivos	36
Capítulo 4. Metodología	37
4.1 Sitio de estudio	37
4.1.1 Clima	38
4.1.2 Geología	38
4.1.3 Edafología	39
4.1.4 Vegetación	40
4.1.5 Decreto del Parque Nacional Cumbres del Ajusco	40

4.1.6 Aspectos sociales	41
4.2 <i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	41
4.3 Método	43
4.3.1 Estimaciones del área de estudio	43
4.3.2 Selección de puntos de muestreo y colecta de datos	43
4.3.3 Densidad arbórea por clase diamétrica	44
4.3.4 Estimación de parámetros	45
4.3.5 Método alternativo de estimación de biomasa y contenido de carbono	46
4.3.6 Valoración económica	47
4.3.7 Estimación de la captura potencial de CO _{2e} a 5 y 10 años	47
Capítulo 5. Resultados	48
Capítulo 6. Discusión	53
6.1. Procedimiento y resultados	53
6.2. Comparación con otros estudios de caso	55
6.3. Político ambiental	56
Capítulo 7. Conclusiones	58
Referencias	60

Resumen

Este estudio de caso se realizó con el propósito de realizar acciones encaminadas a mitigar los efectos del cambio climático, mediante manejo forestal, a través del servicio ambiental de captura de carbono, en un bosque multietáneo y monoespecífico de *Pinus hartwegii*, el cual se localiza dentro del Parque Ecoturístico El Tepozán en el ejido San Nicolás Totolapan ubicado en el Ajusco, alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, México. Se calculó el contenido y captura potencial de carbono, obteniendo 3,451.64 Mg C y 55.68 Mg C año⁻¹ respectivamente. Se usaron ecuaciones alométricas dependientes del diámetro normalizado, el área total de muestreo corresponde al 6.2% de la superficie arbolada del bosque. Este tipo de trabajos pueden brindar el soporte necesario para realizar acciones dirigidas a mitigar coordinadamente y a distintos niveles de la sociedad los efectos del cambio climático, así como atender las causas.

Abstract

This case study was carried out with the purpose of carrying out actions aimed at mitigating the effects of climate change, through forest management, through the environmental service of carbon capture, in a multi-age and monospecific forest of *Pinus hartwegii*, which is located within the El Tepozán Ecotourism Park in the San Nicolás Totolapan ejido located in Ajusco, Tlalpan, Mexico City, Mexico. The content and potential capture of carbon were calculated, obtaining 3,451.64 Mg C and 55.68 Mg C year⁻¹, respectively. Allometric equations dependent on the normalized diameter were used, the total sampling area corresponds to 6.2% of the wooded surface of the forest. This type of work can provide the necessary support to carry out actions aimed at mitigating the effects of climate change in a coordinated manner and at different levels of society, as well as addressing the causes.

Capítulo 1

Antecedentes

La estimación de la captura de carbono es el cálculo de la cantidad de carbono fijado en la biomasa por organismos vegetales. Los estudios de captura de carbono consideran principalmente a los ecosistemas forestales, los cuales son considerados “sumideros de carbono”, la información previa generalmente parte de un inventario forestal (Ordóñez, 2008b; Torres *et al.*, 2010; Ordóñez *et al.*, 2015a). A la fecha existen numerosos estudios de caso relacionados a la captura de carbono por ecosistemas forestales y la derivada valoración económica por dicho servicio ambiental. A continuación, mencionaré un estudio de caso:

Galeana (2008) en su tesis de licenciatura elaboró un mapa de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca del río Magdalena, CDMX. Utiliza un muestreo jerárquico estratificado con distribución sistemática, se midió el diámetro normalizado (DN¹) de cada individuo. Muestra que la cobertura de *A. religiosa* es la que más carbono almacena por hectárea, con 163 toneladas² de carbono por hectárea, y un potencial de captura³ de 1.7 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Le sigue la cobertura del bosque de *P. hartwegii* cerrado⁴ con 47 Mg C ha⁻¹, con una captura potencial de 1.04 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, y finalmente el bosque abierto de *P. hartwegii* con 21 Mg C ha⁻¹ y una captura potencial de 0.46 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

La densidad de la madera e incremento corriente anual (ICA⁵) de *P. hartwegii* se obtuvieron de las monografías del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Obteniendo una densidad de 0.438 (Kg/m³), y un ICA de 4.74 m³ ha⁻¹ año⁻¹. En la estimación de las alturas se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Espinoza (2005); *P. hartwegii* $y = 0.0015 (DN^2) + 0.3956 (DN)$, $r^2: 0.8883$. Mediante ecuaciones alométricas se obtuvo la biomasa y el contenido de carbono. Se estimó 1 millón de pesos anuales derivados del servicio ambiental de captura de carbono.

¹ El diámetro normalizado o diámetro a altura de pecho (DAP) de un árbol se obtiene a partir de la medición del tronco a 1.3 m de altura desde la base.

² Se utilizará la expresión Mega gramo (Mg) en lugar de tonelada.

³ La captura potencial de carbono, o potencial de captura hace referencia a la cantidad de carbono incorporado a la biomasa en un año. En este trabajo se utilizará la expresión Mg C año⁻¹.

⁴ La cobertura de un bosque se puede determinar cómo cerrada o abierta dependiendo del porcentaje que ocupe la copa de los árboles respecto a la superficie total.

⁵ El incremento corriente anual hace referencia al incremento en volumen que obtiene determinada masa forestal cada año.

De acuerdo con la importancia que tiene la conservación y uso sustentable de bosques se realizó una valoración económica derivada de la captura potencial de dióxido de carbono (CO₂) para las áreas naturales protegidas del país (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Representatividad vegetal, contenido de carbono y CO₂, y valoración económica de las Áreas Naturales Protegidas (ANP). Tomado y modificado (Bezaury, 2009).

Vegetación	Superficie total en el país (ha)	Total, en las ANP federales (ha)	Representatividad total dentro de las ANP (%)	Mg C ha ⁻¹	Mt CO ₂ en existencia dentro de las ANP	Valor teórico máximo estimado USD \$12.77 por Mg CO ₂
Bosque de coníferas	16,781,747	1,029,220	6.13	257	264.51	3,337,792,700
Bosque de encino	15,549,092	999,301	6.43	236	235.84	3,011,676,800
Bosque mesófilo de montaña	1,825,205	188,247	10.31	430	80.95	1,033,731,500
Selva Perennifolia	9,465,901	1,392,294	14.71	305	424.65	5,422,780,500
Selva tropical caducifolia, subcaducifolia y espinosa	23,636,061	1,238,562	5.24	154	190.74	2,435,749,800
Pastizal natural, halófito y gipsófilo	12,543,943	245,544	1.96	80	19.64	280,802,800
Matorral xerófilo y vegetación semiárida	57,969,440	6,768,178	11.68	97	656.51	8,383,632,700
Vegetación acuática y subacuática	2,601,064	1,165,078	44.79	282	328.55	4,129,583,500
TOTAL	140,372,453	13,026,424	-	-	2,201.39	28,111,750,300

Esta información hace patente la importancia de la conservación de los bosques para mitigar los efectos del cambio climático.

1.1 Contexto

La extracción y quema de combustibles basados en carbono se ha incrementado exponencialmente desde la revolución industrial hasta la actualidad (Figura 1.1), lo que causa una saturación en la atmósfera de compuestos con efectos nocivos sobre el ambiente y la salud. La quema de combustibles fósiles crea un aumento de las emisiones de CO₂, dicho incremento refleja la competitividad económica entre empresas y naciones (Tafari *et al.*, 2015).

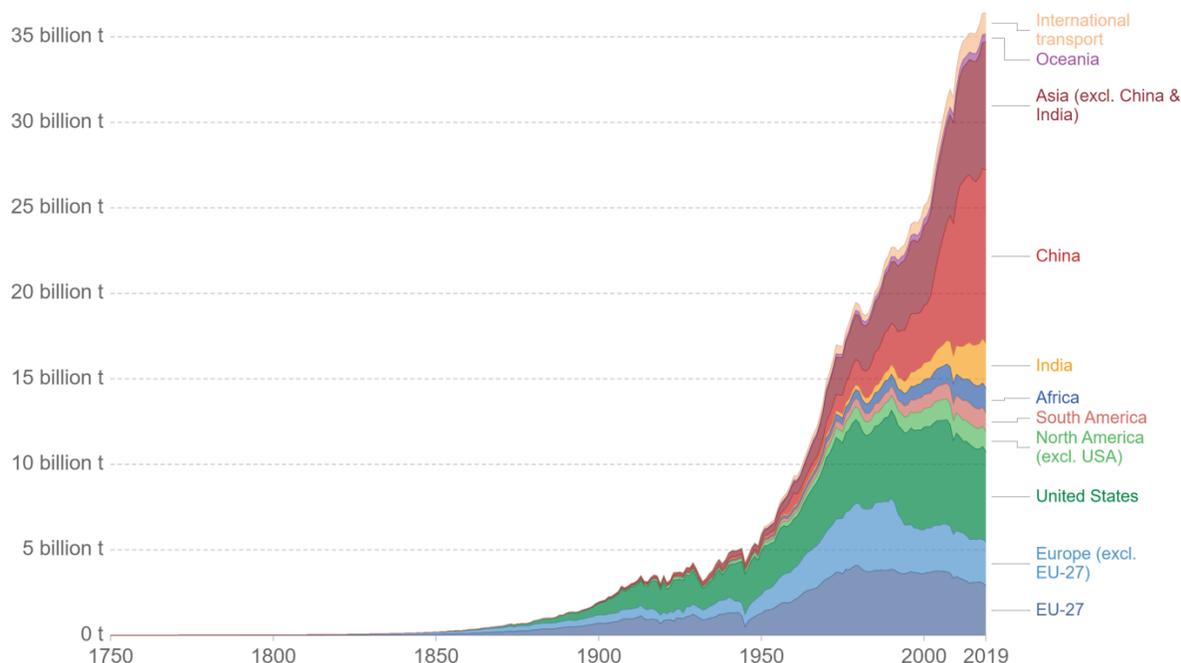


Figura 1.1 Emisiones de CO₂ a través del tiempo en el mundo (Ritchie y Roser, 2019).

Las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0°C respecto a los niveles preindustriales, si las emisiones continúan aumentando al ritmo actual, es probable que el calentamiento promedio global ascienda a 1,5°C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2019).

El incremento de CO₂ en la atmósfera produce un aumento de la temperatura, esto ocurre debido a la retención de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, alterando el régimen térmico e induciendo el calentamiento global del planeta (Franco, 2009). Los gases de efecto invernadero (GEI) involucrados en el calentamiento global son; vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃), gases sintéticos como los clorofluorocarbonos (CFC), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF₆) (IPCC, 2001).

La concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado considerablemente (Figura 1.2), reportándose 419 ppm el mes de abril del año 2021, rompiendo récord respecto al año 2019 (416 ppm) (NOAA, 2021a).

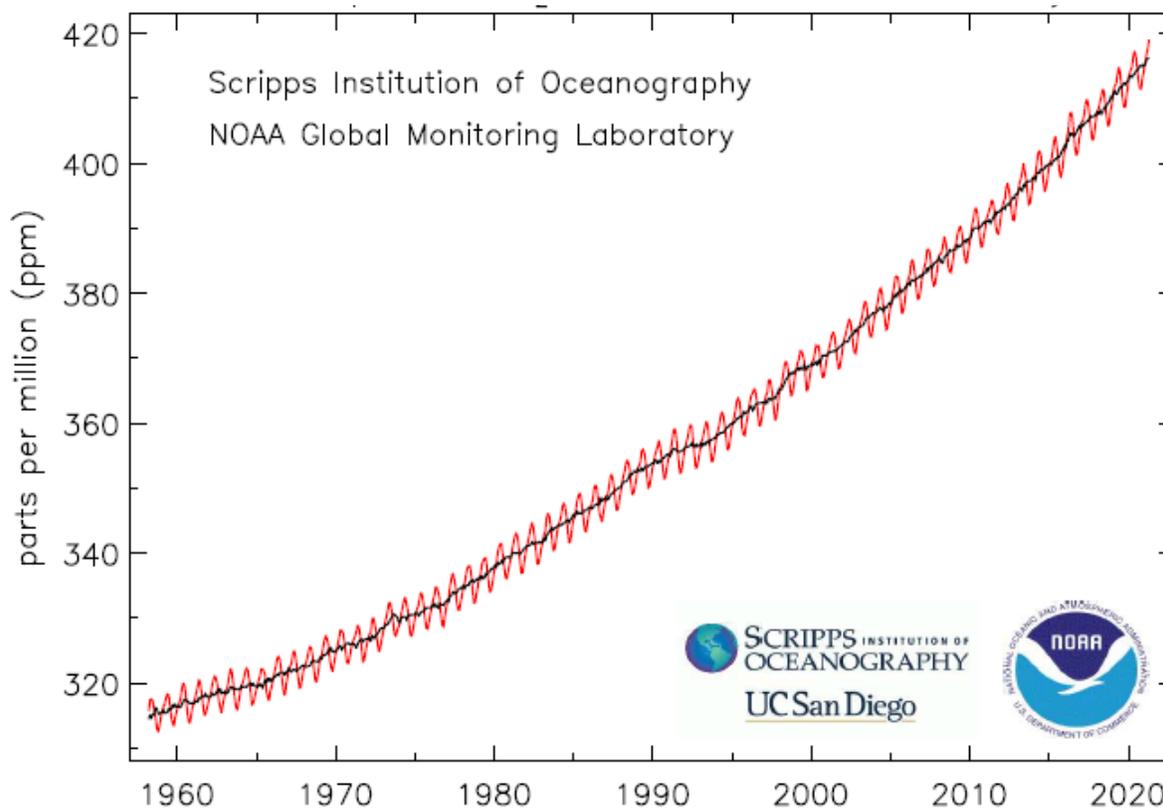


Figura 1.2. Emisiones record de CO₂ (NOAA, 2021a).

La situación ambiental es preocupante, un ejemplo que llama la atención es el caso reportado por la base Marambio en la isla Seymour, Antártida, donde se registra una temperatura atípica de 20.75°C, registro que se aleja del intervalo promedio registrado de -20°C a 0°C (Robinson *et al.*, 2020). Otro hecho que vale la pena mencionar es que durante la pandemia del COVID-19 las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyeron considerablemente, principalmente de CO₂, constando la relevancia de la influencia humana sobre la integridad ambiental (Moreno, 2020).

Es urgente entender que el planeta no puede seguir manteniendo el nivel de consumo de la población a escala mundial. Aproximadamente, de la biomasa total de mamíferos en el planeta, el 60% son animales de ganado, 36% es la humanidad y 4% son animales silvestres (Ezcurra, 2019). En México, el agotamiento de los recursos, la contaminación de ecosistemas y el cambio de uso de suelo son algunos de los efectos que han sido generados por la industria, los cuales afectan la integridad de los ecosistemas y su biodiversidad (Merino, 2019).

Atendiendo a la urgencia climática, en 1992 a partir de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) surge la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC); cuyo objetivo principal es lograr la estabilización de los gases de efecto invernadero en la atmósfera en un plazo que permita la adaptación de los ecosistemas a los efectos del cambio climático, y al mismo tiempo, asegurar la producción de alimentos, procurando que el desarrollo económico sea sostenible. Los países pertenecientes a esta convención son denominados “partes” (CMNUCC, 1992).

Posteriormente, en 1995 se adoptó el Protocolo de Kioto derivándose de la CMNUCC, el cual establece un conjunto de mecanismos, tales como el comercio de derecho de emisiones, en búsqueda de acciones concretas que permitirían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. México firmó el 9 de junio de 1998, ratificándose por el senado de la república el 29 de abril del año 2000. El país no tiene obligaciones cuantitativas de reducción de gases de efecto invernadero, ya que no se está presente en el “Anexo 1” de la CMNUCC (Naciones Unidas, 1998; SEMARNAT, 2015; México ante el cambio climático, 2021).

Antes del Protocolo de Kioto la cuestión forestal tenía poca importancia en las negociaciones internacionales. Fue en la COP⁶ 13 año 2007, realizada en Bali, cuando se reconoció la importancia del tema y se tomó la iniciativa de establecer un esquema para evitar la degradación forestal, deforestación y cambios de uso de suelo (CONAFOR, 2010).

En el 2012 en México, se decreta la Ley General de Cambio Climático (LGCC), la cual consta de una serie de estrategias para utilizar el “capital natural” de manera sustentable, se busca desarrollar una “economía verde”, que logre incrementar la competitividad económica y la calidad de vida de la población. Un ejemplo de estas iniciativas es el surgimiento del mercado voluntario de bonos de carbono en México a partir de la LGCC (DOF, 2019).

Posteriormente, en diciembre del 2015 durante la COP 21, se aprobó el Acuerdo de París sobre cambio climático, el cual tiene como objetivo principal que el aumento de la temperatura global no rebase los 2°C respecto a los niveles preindustriales. Se hace un llamado a acatar las responsabilidades y reducir las emisiones. Se busca aumentar la resiliencia de los ecosistemas al desarrollar mecanismos financieros que impulsen los mercados de emisiones de CO₂. (PINCC UNAM, 2016).

⁶ “Conferencia de las partes”

El Acuerdo de París propone cuatro medidas en particular: 1) mitigación (reducción de los GEI promoviendo una economía con bajas emisiones); 2) adaptación (capacidad adaptativa de los socio ecosistemas y naciones a los efectos adversos del cambio climático resultando en resiliencia global); 3) financiamiento (movilización de tecnologías y recursos financieros en dirección a mitigar los efectos del cambio climático y lograr un desarrollo sostenible); y 4) diferenciación (manteniendo en cuenta las responsabilidades en común, diferenciar y tener en consideración las respectivas capacidades a las diversas circunstancias nacionales) (UNFCCC, 2016).

Fueron propuestos a nivel mundial "Mecanismos de Desarrollo Limpio", como resultados del Protocolo de Kioto, para que países en desarrollo puedan percibir incentivos por la venta de bonos de carbono derivados del establecimiento de proyectos de captura de carbono y de la certificación en la reducción de sus emisiones (Ordóñez y Masera, 2001).

Sumando esfuerzos en el resguardo de la naturaleza se establecieron 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura 1.3) con el propósito de mitigar y revertir la crisis socioambiental, tomando como prioridad las regiones donde la población es más vulnerable a los efectos del cambio climático (Naciones Unidas, 2015).



Figura 1.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015)

Un compromiso de México es reducir con sus propios recursos 25% de sus emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030, y hasta 40% de contaminantes de vida corta, siempre y cuando se establezcan convenios que aborden temas como el precio internacional del carbono, la cooperación técnica, el

acceso a recursos financieros de bajo costo y la transferencia de tecnología (Gobierno de la República, 2016).

A su vez, se creó el programa REDD+ como una herramienta que pretende reducir las emisiones de GEI causadas por la deforestación y la degradación de los ecosistemas forestales, y al mismo tiempo fomenta la conservación, el manejo sustentable de los bosques y el mejoramiento de inventarios de carbono. Concentra sus esfuerzos en articular y mejorar las políticas, buscando adecuarlas con un enfoque territorial sustentable (Mallén *et al.*, 2018).

En la actualidad, aproximadamente el 80% de los bosques están sujetos a presiones sociales, lo que ha generado cambios de uso de suelo forestal, a usos agropecuarios, urbanos e industriales. Esto es propiciado por las complejas condiciones económicas en zonas rurales, entre muchas otras (Burstein *et al.*, 2002). Por ahora el cambio de uso del suelo (Figura 1.4) es la segunda fuente de carbono, después de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2001; Ordóñez y Masera, 2001).



Figura 1.4. Cambio de uso de suelo. (Zaragoza, 2017).

Los bosques capturan, almacenan y liberan carbono, como resultado de los procesos fotosintéticos de respiración y de degradación. El saldo es una captura neta positiva que depende del manejo de la cobertura vegetal, edad, distribución de tamaños, estructura y composición del bosque (Ordóñez, 1999). Los bosques son considerados como sumideros de carbono, ya que absorben grandes cantidades de este elemento, para poder obtener una estimación real de la captura y contenido de carbono es necesario tener en cuenta el tipo de cobertura vegetal y uso de suelo (CMNUCC, 1992; Torres y Guevara, 2002).

La estructura y composición de los bosques son producto de las adaptaciones a condiciones específicas del ambiente (Grijpma, 1984); se define la estructura forestal como el conjunto de especies arbóreas relacionadas e interdependientes, distribuidas en un espacio determinado, con una altura y una cobertura dada, de esta forma se diferencian unas especies forestales de otras por su composición, edad o estado (Ordóñez y Medrano, 2003).

Se han propuesto estrategias de mitigación al cambio climático en respuesta a la crisis climática, tales como la captura de carbono por parte de ecosistemas forestales, teniendo como objetivo reducir la cantidad de carbono en la atmósfera, además es un servicio ambiental relacionado con funciones de regulación (Ordóñez, 1999; CCA, 2001). Como estrategia de mitigación se realizó una propuesta relacionada al potencial de reducción de CO₂ mediante un mercado de bonos de carbono, en la cual se estudian tres sectores: 1) energía eléctrica; 2) producción de acero, y 3) cambio de uso de suelo y silvicultura. La mayor oportunidad recae sobre pequeñas y medianas empresas (DOF, 2019). “Se coincide en que la capacidad del sector privado para incorporar prioridades ambientales será una cuestión empresarial clave” (CCA, 2001).

En México, se publicó el “Acuerdo en el que se establecen las bases preliminares del programa de prueba del sistema de comercio de emisiones”, que explica las condiciones para un periodo de prueba, el cual comenzó el 1 de enero del 2020 y finalizará el 31 de diciembre del 2022, dicho periodo será una transición al periodo operativo. Este acuerdo aplica para instalaciones cuyas emisiones sean mayores o iguales a 100 mil toneladas de CO₂, cada tonelada de CO₂ tendrá un costo de 10 dólares. El objetivo es reducir 22% de GEI y 50% de carbono negro para el 2030 (DOF, 2019).

En la Sexta Comunicación Nacional y Segundo Reporte Bienal de Actualización que México presentó ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 2018, se muestra la actualización de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Se destaca el cálculo de las absorciones de las tierras forestales, con absorciones del orden de -167 MtCO₂e⁷ para el año 2015. Las emisiones totales del inventario sin considerar estas absorciones son de 683 MtCO₂e, pero al considerar las absorciones las emisiones netas son de 535 MtCO₂e. También son consideradas las emisiones provenientes de cambios de uso de suelo, degradación e incendios

⁷ El dióxido de carbono equivalente (CO₂e) es la unidad de referencia respecto al volumen y potencial de calentamiento que tienen los otros GEI.

forestales, estas emisiones contribuyen con 20 MtCO_{2e} (INECC-SEMARNAT, 2018).

México es el país con mayor extensión forestal en propiedad colectiva (comunidades, ejidos y pueblos), la cual es sensible a las demandas del mercado (Mallén *et al.*, 2018), un ejemplo de esto es la demanda de pinos en navidad, actividad por la que han optado en centenas de sitios (Figura 1.5).



Figura 1.5. Productores de árboles de navidad (Mallén *et.al.*, 2018)

Se estima que para 2030 México podría tener una captura potencial total de carbono dentro de un rango de 2.34 a 3.02 Gt C para una superficie de 26.4 M ha (mega hectáreas o $1 \cdot 10^6$ hectáreas) en un escenario de política de apoyo y, de 4.18 a 5.12 Gt C para una superficie de 39 M ha en un escenario de potencial tecnológico (Masera, 1995). Esto significa una captura anual de 67 a 116 Mt C año⁻¹, representando la mayor o total parte de las emisiones del sector energético e industrial en México (Ordóñez, 1999).

En ese sentido, el presente estudio de caso propone un proyecto de captura de carbono para el bosque del Parque Ecoturístico el Tepozán, el cual es planteado por la organización civil Servicios Ambientales y Cambio Climático SACC, A.C., en asociación con Huertos familiares y afines en México. El servicio ambiental de "captura de carbono" que brinda el Parque Ecoturístico el Tepozán podría entrar en el "Programa para el Desarrollo de los Mercados de Servicios Ambientales de Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad, y para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de los Sistemas Agroforestales" (PSA-CABSA) (CONAFOR, 2011).

Se trabajó con un bosque de *P. hartwegii*, los cuales se caracterizan por crecer hasta la línea superior. En altitudes moderadas comparte espacio con *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *A. religiosa* y *C. lusitánica*. Estos bosques presentan una estructura simple con sotobosque de hierba-racimo (Velásquez *et al.*, 2000; Earl, 2020). Se establecieron siete puntos de muestreo, donde los datos registrados son el número de árboles y el diámetro normalizado de cada uno, el cual se mide a 1.3 m de altura. Es importante mencionar que contemplaremos únicamente la biomasa aérea del fuste en la estimación del contenido y captura potencial de carbono y de CO₂.

En la estimación del contenido y captura potencial de carbono se consideraron parámetros como la densidad de la madera, la cual cambia para cada especie y etapa de vida, ya que, a mayor diámetro del tronco el contenido de carbono aumenta también debido a la acumulación de compuestos orgánicos y a la lignificación (Raghavendra, 1998). También se considera el área basal, altura, volumen, biomasa aérea, contenido de carbono, entre otros parámetros que son explicados en el marco teórico.

La obtención de dichos parámetros se ha realizado tradicionalmente a partir de métodos denominados directos, los cuales consisten en muestreos destructivos, generalmente muy costosos y que demandan tiempo, lo cual hace que su aplicación en áreas grandes resulte compleja e incluso puede conducir a la degradación de los ecosistemas (Ordóñez *et al.*, 2008c; Basuki *et al.*, 2009; Ordóñez *et al.*, 2015a). Al respecto se han desarrollado otros procedimientos indirectos (no destructivos) que derivan de modelos matemáticos, por ejemplo, ecuaciones alométricas, en las que se relacionan variables como diámetro normalizado y altura, con variables difíciles de medir (biomasa y contenido de carbono, entre otros) (Díaz, 2014; Ordóñez *et al.*, 2016).

Otro método que ha ganado importancia en los últimos años ha sido el de utilizar correlaciones entre información de los inventarios forestales con datos espectrales que provienen de distintos sensores remotos (imágenes satelitales, radar entre otros) (Muñoz *et al.*, 2014; Acosta, *et al.*, 2014; Carrillo *et al.*, 2016).

Este estudio calcula una aproximación de la cantidad de carbono y CO₂ que almacena y captura anualmente un bosque de *P. hartwegii* de este tipo en su biomasa aérea, lo cual puede aportar información útil en la planificación de futuros estudios de caso de captura de carbono en ecosistemas forestales. Además, se realiza una comparación de metodologías para la estimación de biomasa y contenido de carbono, en la cual el método alternativo no contempla la altura como variable.

Capítulo 2

Introducción

En este capítulo se indaga sobre la naturaleza de la crisis ambiental, las propuestas de mitigación, se brindan los conceptos necesarios de los parámetros empleados en la metodología, y se justifica el estudio de caso.

2.1 El clima

Se considera como: las condiciones promedio resultantes de las interacciones entre la atmósfera, hidrosfera, criósfera, litósfera y biósfera en un intervalo de 30 años, el resultado calorífico de esta interacción es producto de una relación entre la entrada, permanencia y salida de energía radiactiva. Está determinado por elementos (temperatura, precipitación, velocidad del viento, humedad, radiación solar, entre otros) y factores condicionantes (como latitud, altitud, relieve, entre otros). El sistema clima se ejemplifica en la figura 2.1, y se podría llegar a confundir con el concepto de tiempo meteorológico, el cual describe las condiciones ligadas a las variaciones atmosféricas diarias. (Engracia, 2004; Oralia *et al.*, 2004; Conde, 2006; Molina *et al.*, 2017).



Figura 2.1. Componentes del clima (Llorente, 2002).

En México las variables climáticas se observan y miden por estaciones climatológicas y meteorológicas, la información obtenida se expresa por medio de mapas que muestran la evolución espacio temporal de los fenómenos (RUOA, 2020).

2.1.1 La atmósfera

Está compuesta de gases que decrecen en su concentración con la altura hasta formarse una franja homogénea respecto al gas interplanetario, no tiene un límite superior bien definido como se observa en la figura 2.2 (Casas y Alarcón, 1999). Fundamental en el equilibrio termodinámico de la Tierra, cualquier cambio en su composición física o química altera directamente el estado de la biodiversidad (García, 1989; Cuadrat y Pita, 1997).

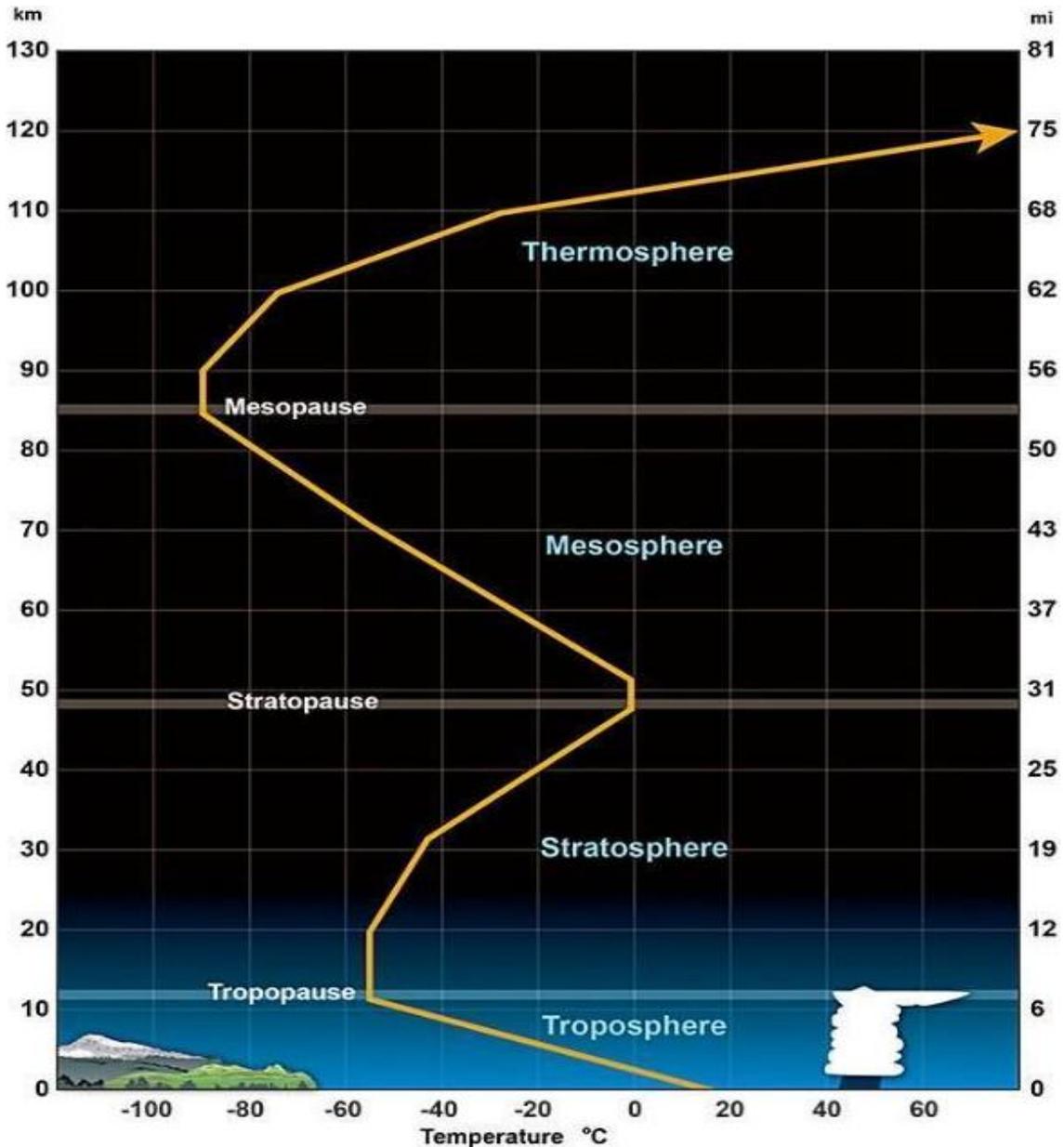


Figura 2.2. Capas de la atmósfera, espesor en kilómetros - millas y su gradiente de temperatura. (NWS, 2020).

La atmósfera es el medio en el cual se generan y propagan los climas en el planeta, es heterogénea y presenta una diferenciación de temperaturas, debido a la concentración y distribución de los gases que la componen, los cuales se muestran en la tabla 2.1, siendo en la troposfera (8 a 10 km) donde ocurren los fenómenos más importantes que determinan las características del clima. En la troposfera la temperatura desciende casi linealmente hasta los -60°C aproximadamente (García, 1989; Aznar *et al.*, 1992).

Tabla 2.1. Principales gases que componen la atmósfera y su concentración (Wallace y Hobbs 2006; Mohanakumar, 2008, García, 2011; Hurst *et al.*, 2011; Dlugokencky *et al.*, 2016; NOAA, 2021b).

Componente	Partes por millón (ppm)
Nitrógeno (N_2)	780,800
Oxígeno (O_2)	209,500
Argón (Ar)	9.340
Dióxido de carbono (CO_2)	413.93
Vapor de agua (H_2O)	3.5-5.5
Neón (Ne)	18
Helio (He)	5
Metano (CH_4)	1.88
Kriptón (Kr)	1
Hidrógeno (H_2)	0-5
Óxido nitroso (N_2O)	0.33
Ozono (O_3)	0-0.1
Aerosoles y polvo	Altamente variable

Las ciencias atmosféricas son responsables de entender los cambios del clima a escala global, causantes de condiciones extremas que provocan periodos de sequía, cosechas pobres, hambrunas, problemas de salud y migraciones masivas de la población (Magaña y Gay, 2002).

2.1.2 Ciclo global del carbono

En los organismos vegetales (Figura 2.3), el ciclo comienza con la fijación del CO_2 atmosférico por el metabolismo de la fotosíntesis, el CO_2 es absorbido introduciéndose en el metabolismo de la fotosíntesis mediante la enzima Rubisco (Lorimer, 1976; Portis, 1995; Caemmer y Quick, 2000), parte del CO_2 capturado devuelve una fracción despreciable respecto al total incorporado a la biomasa (Raghavendra, 1998; Douce y Helot, 2000). En el proceso el CO_2 y el agua reaccionan formando carbohidratos y liberando oxígeno simultáneamente, parte del carbohidrato se consume para dar energía a la planta y el CO_2 restante se libera a través de hojas y raíces. Parte de los carbohidratos es consumida por animales e insectos, que al inhalar oxígeno exhalan CO_2 . Las plantas y animales fijan carbono en sus cuerpos, cuando mueren se descomponen y liberan CO_2 por oxidación del carbono (Smith *et al.*, 1993; Schimel, 1995; Ordóñez, 1999).

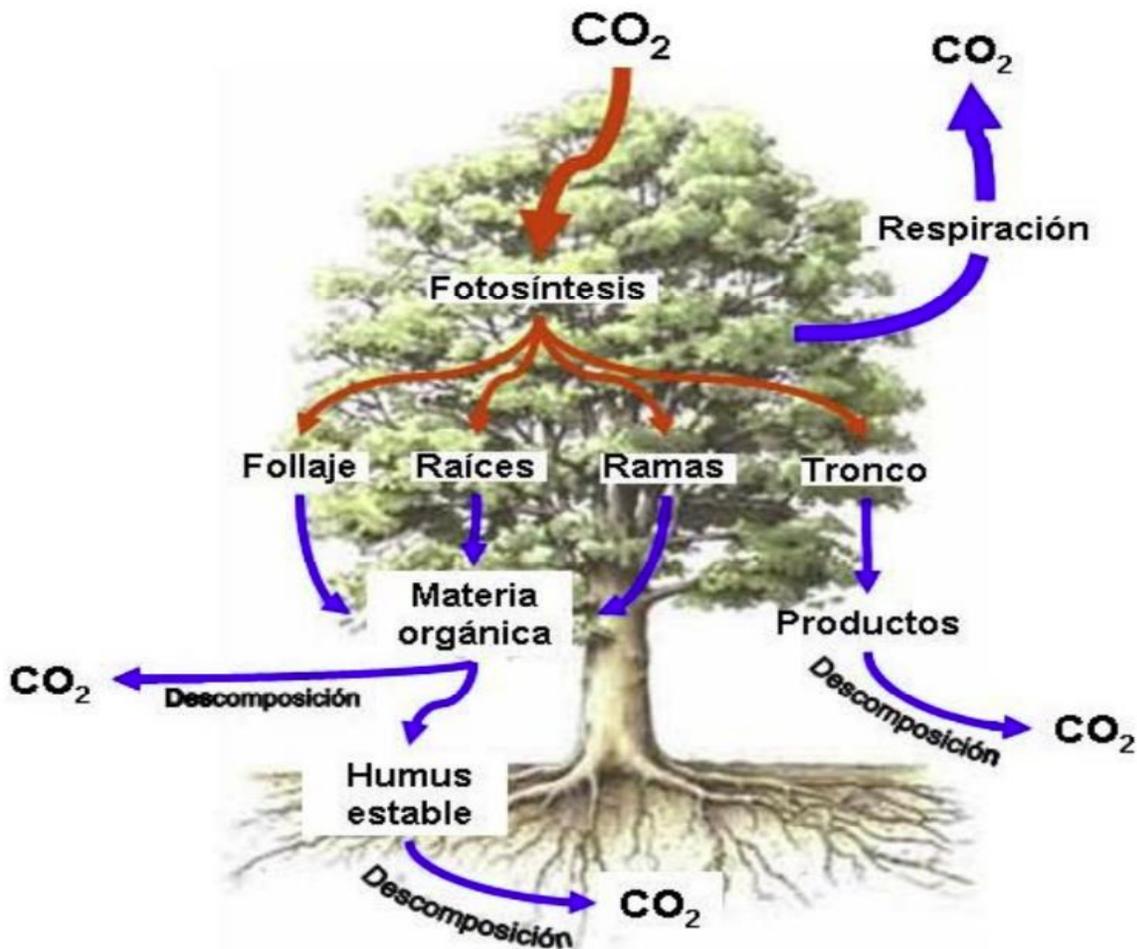


Figura 2.3. Flujos de carbono en los árboles (Fragoso, 2003).

Los procesos de captura y emisión de carbono se llevan a cabo en cuatro reservorios: la atmósfera, los océanos, la litosfera y la biósfera (Figura 2.4)

(Houghton, 2003; Ordóñez, 1999), se separan en un ciclo geoquímico y otro bioquímico.

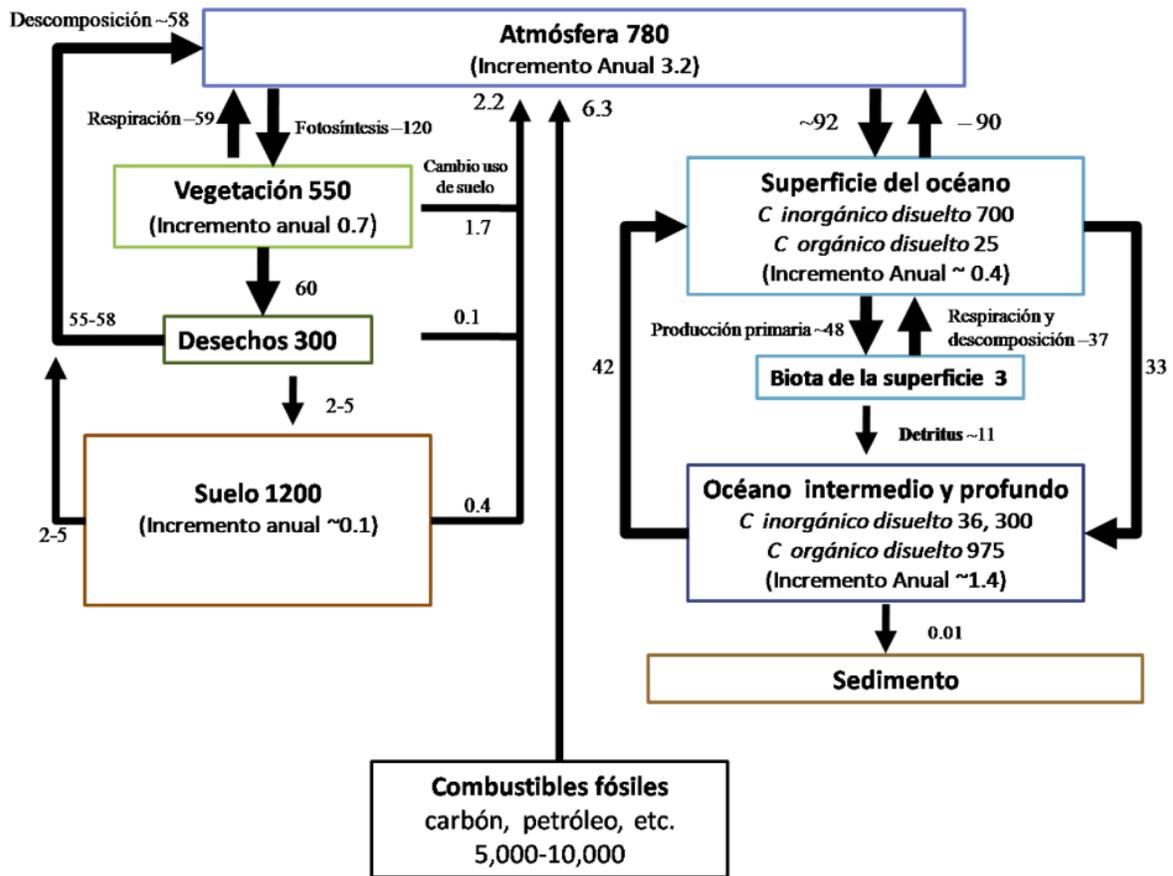


Figura 2.4. Ciclo general del carbono y reservorios (Houghton, 2003). Unidades en PgC, Pg= petagramo= 1×10^{15} = Gt gigatonelada.

La mayor parte del carbono está en la litosfera, en rocas carbonatadas como mármol y piedra caliza, que, al desgastarse, se liberan carbonatos volviendo al ciclo. En el fondo marino se forman rocas a partir de los sedimentos de animales y plantas muertas, así que la cantidad de carbono en el ciclo permanece constante (Sampson *et al.*, 1993).

En las décadas de 1980 y 1990, se pensaba que tanto la biósfera oceánica como la terrestre tomaban cantidades similares de CO_2 de la atmósfera. Sin embargo, gran parte de la captura terrestre es devuelta a la atmósfera por actividades humanas (Malhi, 2002; Sabine, 2006; Calvo, 2019).

Aproximadamente 50% del peso seco de cualquier organismo es carbono (Smith *et al.*, 1993), cuando los organismos vegetales se comprimen por deposición, sufren cambios bioquímicos formando turba, lignita y finalmente

carbón. Los organismos marinos sufren cambios semejantes, formando petróleo después de un largo periodo (Ordóñez, 1999).

El ciclo del carbono se ha alterado debido a la influencia de las actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo y la deforestación (Figura 2.5). Los reservorios de carbono como la atmósfera, biósfera y océanos sufren descompensaciones que son provocados por la demanda mundial de los combustibles fósiles. Aunque los organismos marinos fotosintéticos capturen una parte del carbono emitido, la saturación de carbono en los océanos resulta en ácido carbónico y acidificación del agua, dificultando a estos organismos la fijación del carbono disuelto en carbonato de calcio (Orr *et al.*, 2005; IPCC, 2007).

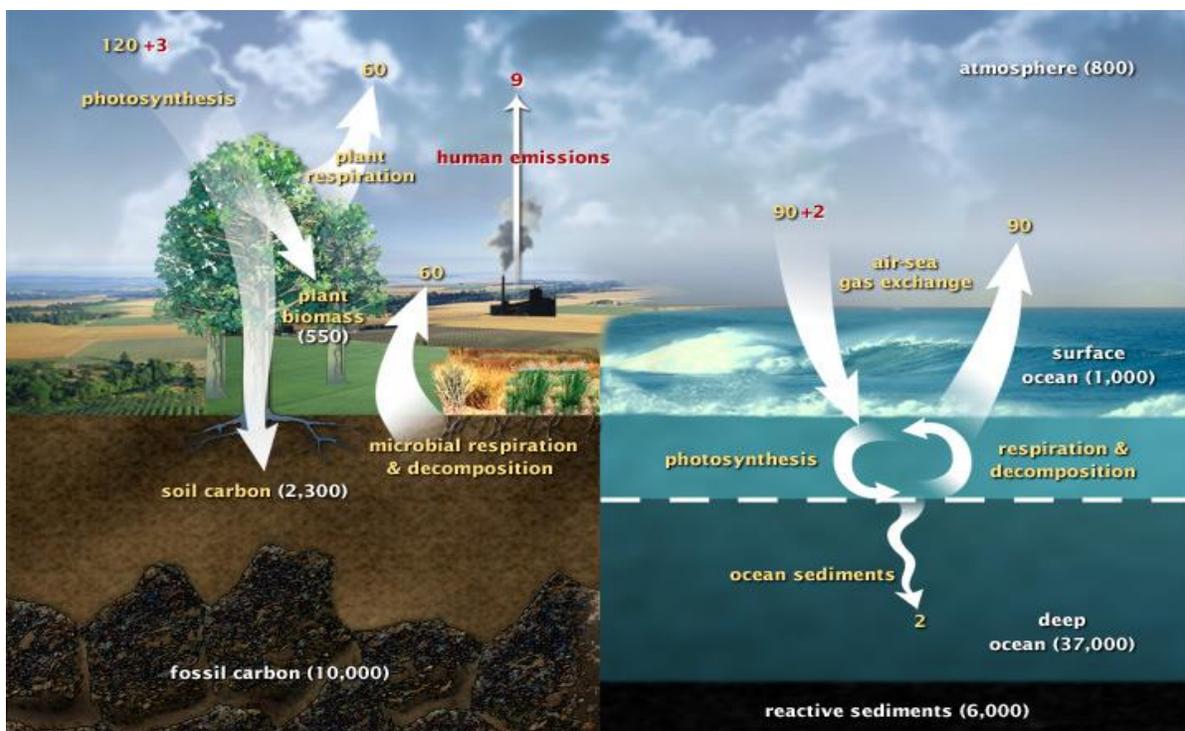


Figura 2.5. Ciclo global del carbono (Riebeek, 2011).

En los bosques cada árbol busca espacio para recibir energía solar, lo que provoca que las copas de los árboles compitan por la luz originando 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”. Los bosques son una importante alternativa de reducción de CO₂; el carbono contenido en los ecosistemas forestales fluctúa según la cobertura vegetal, uso de suelo y la cantidad de productos forestales (Figura 2.6) (Ordóñez, 1999).

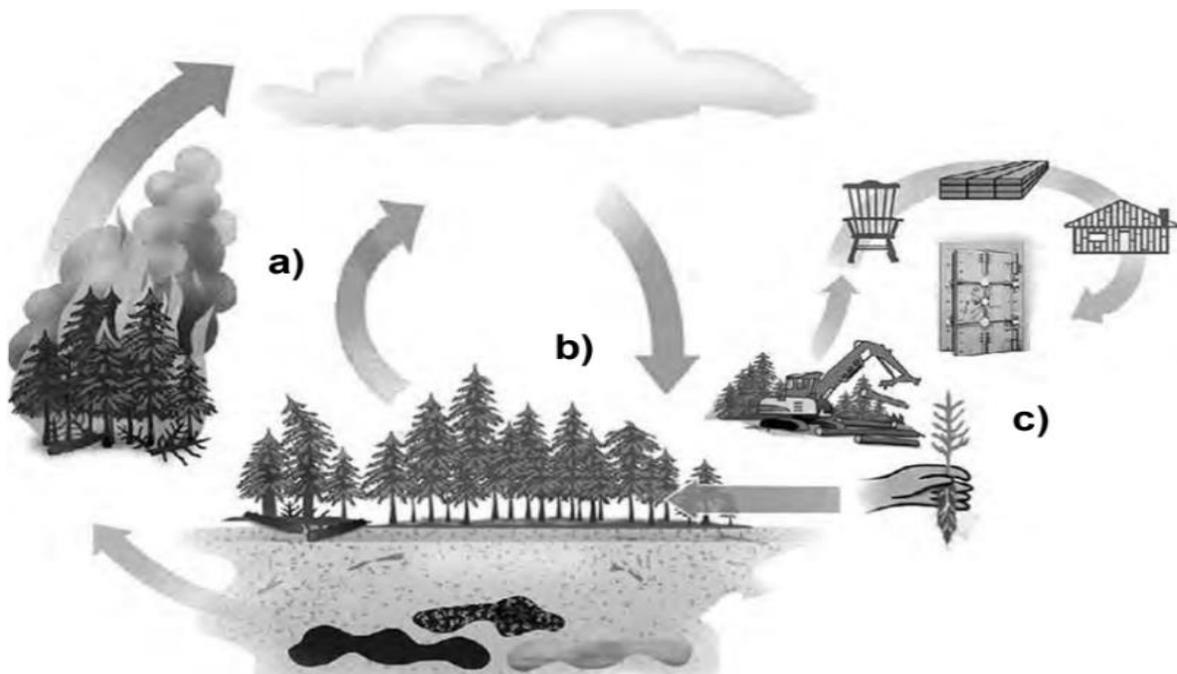


Figura 2.6. Flujos de carbono de un ecosistema forestal. a) Liberado por la respiración, incendios y descomposición, b) absorbido por la fotosíntesis, y c) contenido en la biomasa y productos forestales (TFF, 2008).

Las actividades humanas tienen el potencial de remover el carbono de sus reservorios naturales, transformando este elemento según convenga. El sector industrial es en gran parte responsable de las alteraciones del ciclo del carbono (Figura 2.7) (IPCC, 2019).

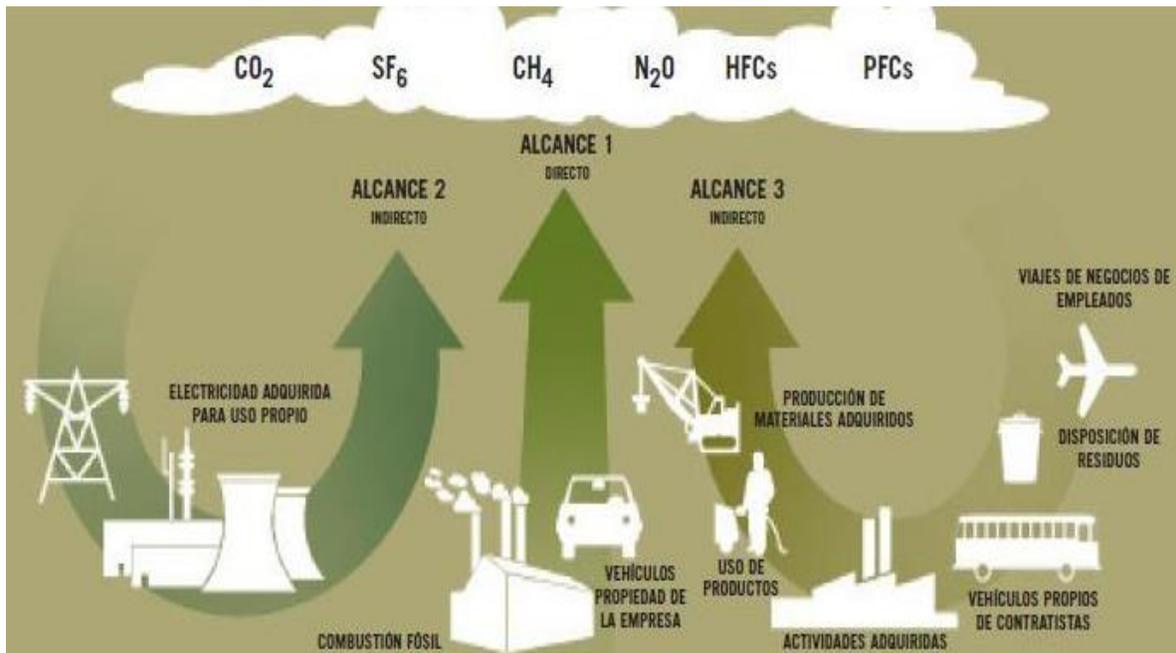


Figura 2.7. Emisiones del sector industrial (Margarita, 2017).

2.1.3 El efecto invernadero

Ocurre cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre (onda corta), se refleja en la superficie (onda larga) y el calor es atrapado por gases de efecto invernadero (Figura 2.8), los cuales tienen diferencias en su capacidad calorífica (Ordóñez, 1999; Garduño, 2004; Caballero *et al.*, 2007).

Del 100% de la radiación solar que llega a la Tierra, aproximadamente, el 20% es absorbido por la atmósfera, el 30% es reflejado hacia el espacio exterior por el efecto albedo y el 50% restante es absorbido por la superficie (IPCC, 2013).

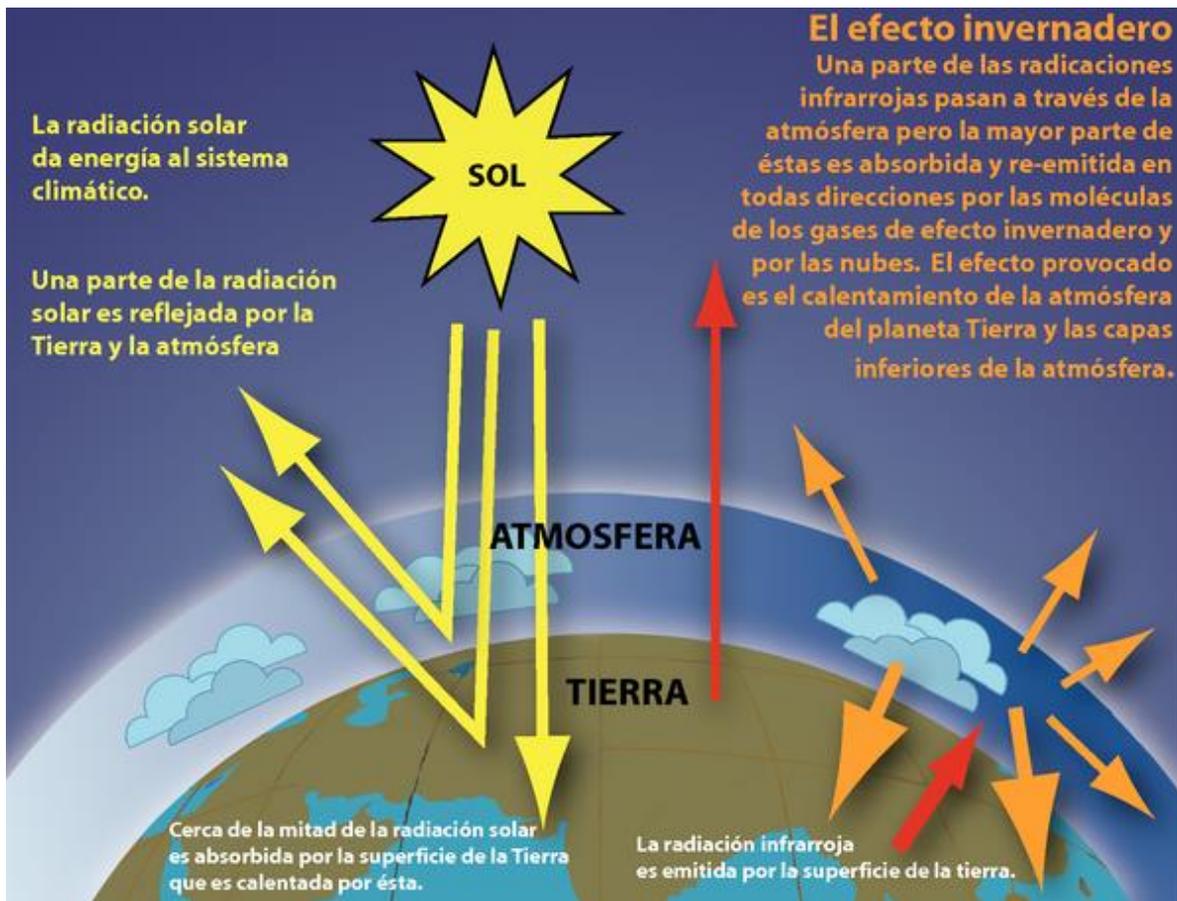


Figura 2.8. Modelo del efecto invernadero (IPCC, 2007).

El consumo de combustibles fósiles, la deforestación e incendios forestales, genera un aumento del efecto invernadero y de retención térmica, al existir más gases se atrapa mayor radiación, lo cual eleva la temperatura repercutiendo en las variaciones climáticas. Los cambios observados del clima han repercutido en los ecosistemas, a su vez este daño afecta a la economía y a la sociedad, vulnerando la habitabilidad y la economía de las regiones más expuestas a los efectos del clima, tales como sequías, inundaciones, precipitaciones intensas, entre otros fenómenos catastróficos (Plass, 1956; IPCC, 2001).

En general, las actividades humanas producen emisiones, siendo el transporte y la industria las de mayor impacto (Figura 2.9). El dióxido de carbono (CO_2) ocupa 77% de las emisiones netas, el metano (CH_4) ocupa 14% por actividades del sector agrícola (IPCC, 2007); el óxido nitroso (N_2O) ocupa 8% y es emitido por la combustión de biomasa, fertilizantes, agricultura y fuentes biológicas (IPCC, 2001 y 2007), y los clorofluorocarburos (HFC, PFC y SF_6) ocupan 1% y se emiten por la producción industrial, refrigerantes, aerosoles y solventes, los cuales permanecen de 2 a 50,000 años en la atmósfera (IPCC, 2001).

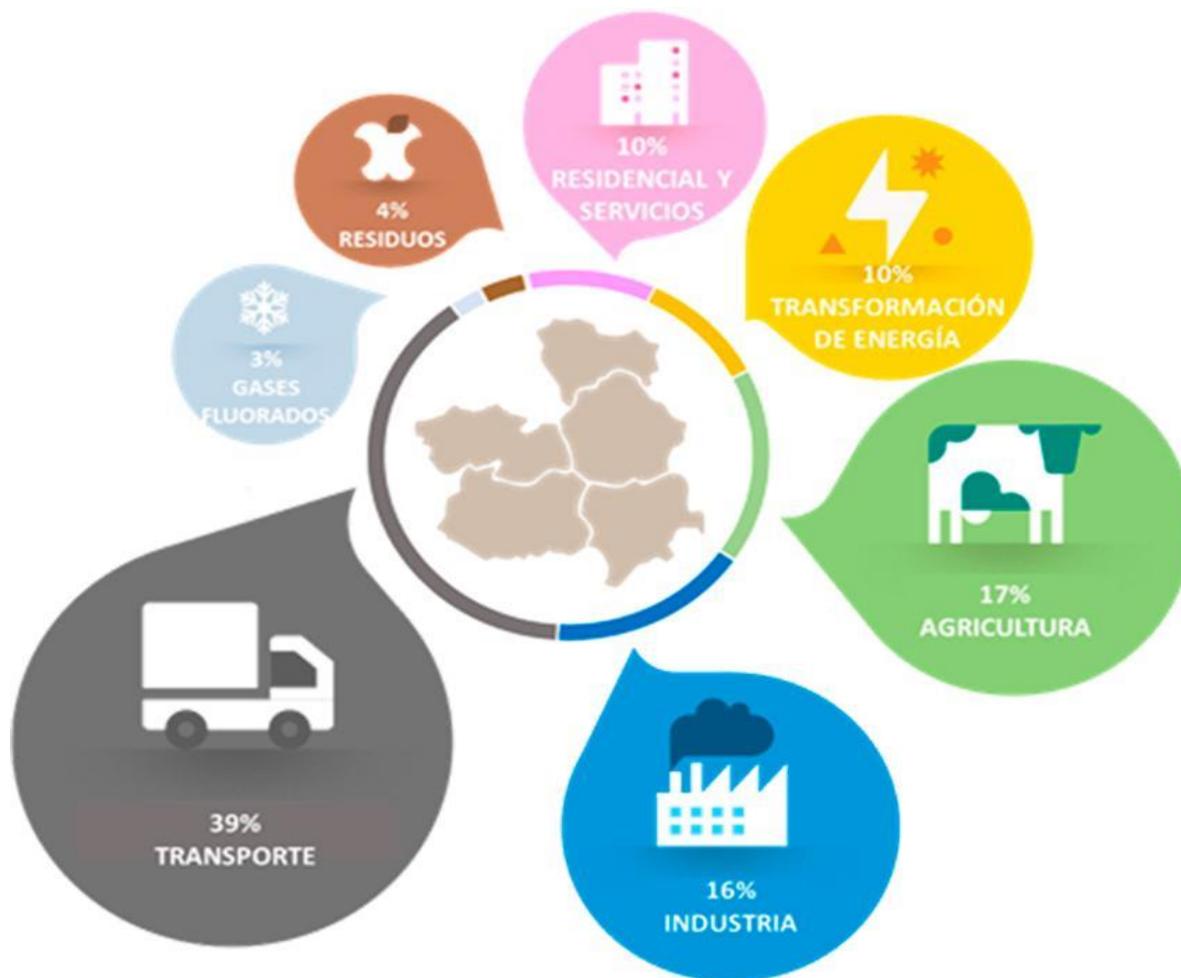


Figura 2.9. GEI asociados a actividades humanas (Ciencias Ambientales, 2019).

Los gases de efecto invernadero (Tabla 2.2) reconocidos por el Protocolo de Kioto, son el Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), derivados Fluorados del Metano y Etano (HFC), los Perfluorocarbonos (PFC) y el Hexafluoruro de Azufre (SF_6) (Ordóñez y Masera, 2001).

Tabla 2.2. Características principales de los GEI. Modificado (IPCC, 2007; IPCC, 2013a; IPCC, 2014; NOAA, 2021).

Origen	Gas	Fuentes	Concentración		Tiempo en la atmósfera (años)	Forzamiento acumulativo (20 años)
			Preindustrial (1750)	Actual ⁸		
Natural	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Combustibles fósiles, leña, deforestación, reacciones químicas y en procesos de manufactura.	278 ppm	413.93 ppm (2021)	No se puede dar solo un periodo determinado	1
	Metano (CH ₄)	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura, escape de gas en minas y pozos petroleros.	722 ppb	1886.6 ppb (2021)	12.4	84
	Óxido nitroso (N ₂ O)	Producción y uso de fertilizantes nitrogenados y deforestación.	270 ppb	334.2 ppb (2021)	121	264
Antropogénico	Hidrofluorocarbonos (HFCs)	Procesos de manufactura y usados como refrigerantes	0	14 ppb (1998)	1.5	506
	Perfluoro carbonos (PFCs)	Procesos de manufactura y usados como refrigerantes.	40 ppb	80 ppb (1998)	50,000	4880
	Hexafluoruro de Azufre (SF ₆)	Procesos de manufactura donde se usa como fluido dieléctrico.	0	10.64 ppt (2021)	3, 200	23,500

Las concentraciones de los GEI (Figura 2.10) han desequilibrado la termodinámica atmosférica, aumentando la temperatura media superficial del planeta (Ordóñez, 1999; Barry y Chorley, 1999). Un aumento de la concentración de los GEI ocasiona una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y una radiación efectiva hacia el espacio; originando un forzamiento radiativo⁹ que intensifica el efecto invernadero, provocando el “efecto invernadero intensificado” (IPCC, 2013b;

8 Valores actualizados (NOAA, 2021b).

9 Alteración del flujo radiativo natural en la atmósfera (Watts por metro cuadrado, WM²) (Cuatecontzi, 2007).

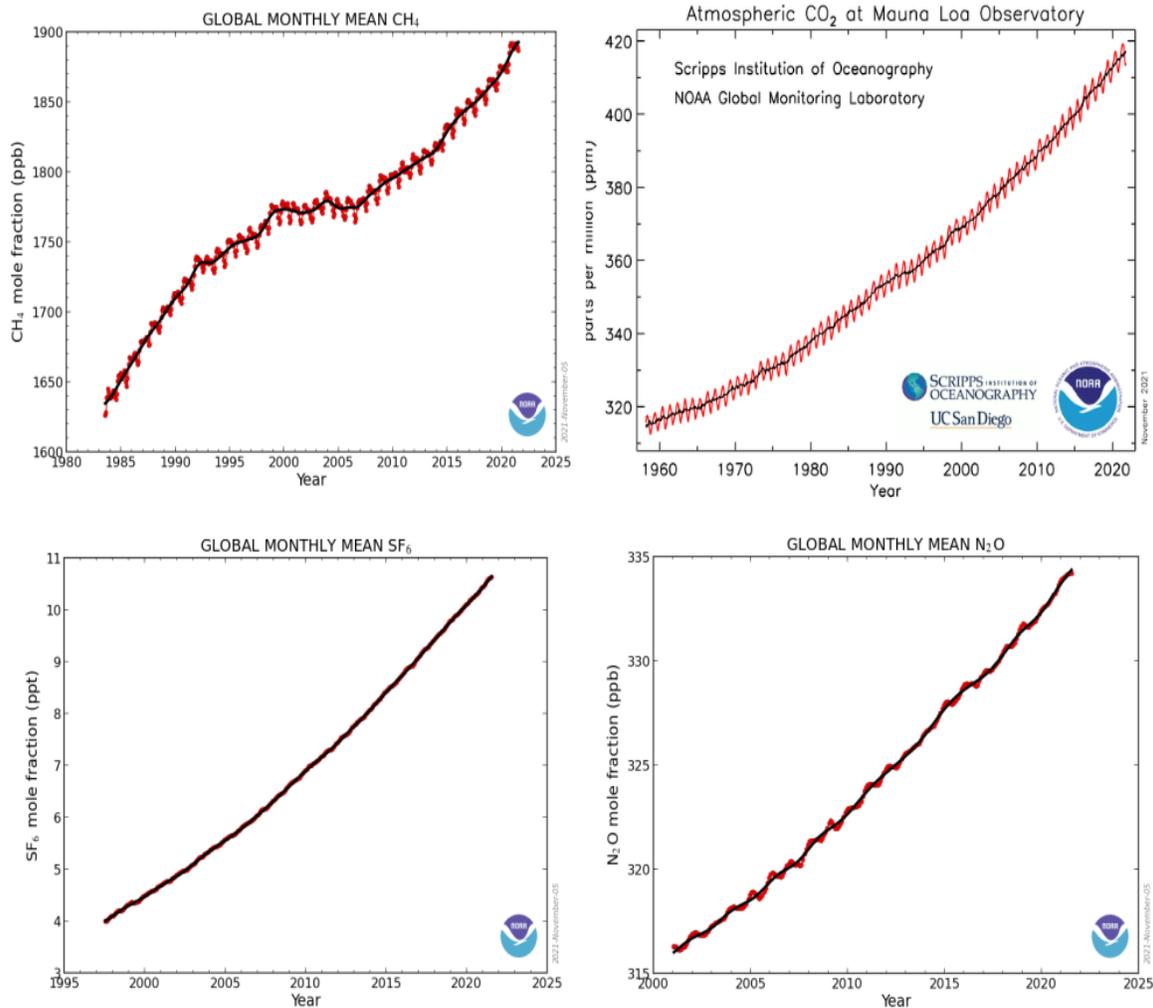


Figura 2.10. Emisiones históricas de GEI. (tomado y modificado de NOAA, 2021).

Sathaye (2001) propone estrategias de mitigación a la concentración de gases de efecto invernadero, algunas son:

- 1) Evitando la liberación de carbono almacenado en la vegetación (conservación de bosques),
- 2) Aforestación, reforestación y agroforestería, y
- 3) Sustitución de combustibles fósiles.

Con el propósito de disponer de una base de datos confiable, En México, en respuesta a los compromisos adquiridos, se elabora un “Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero”, el cual sirve de antecedente para

realizar acciones de monitoreo, mitigación y adaptación al cambio climático (INECC y SEMARNAT, 2015).

2.2 Cambio climático

El cambio climático es un fenómeno que se entiende como una desviación del tiempo meteorológico promedio para un lugar y tiempo dados. En la actualidad el cambio climático global se atribuye al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2007). Este fenómeno global incide sobre personas de escasos recursos, en países en vías de desarrollo o subdesarrollados; gente en pobreza y marginación sufre los efectos inmediatos del cambio climático como la crisis del agua, alimentos y de vivienda (IPCC, 2014).

La Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como los efectos en el clima generados por actividades humanas (IPCC, 1990; IPCC, 1992; Naciones Unidas, 1992; IPCC, 1995; IPCC, 2001; IPCC, 2007; IPCC, 2013).

Las actividades humanas han ocasionado una alteración en la composición de la atmósfera, originando un aumento de la temperatura global (Figura 2.11) (CMNUCC, 1992).

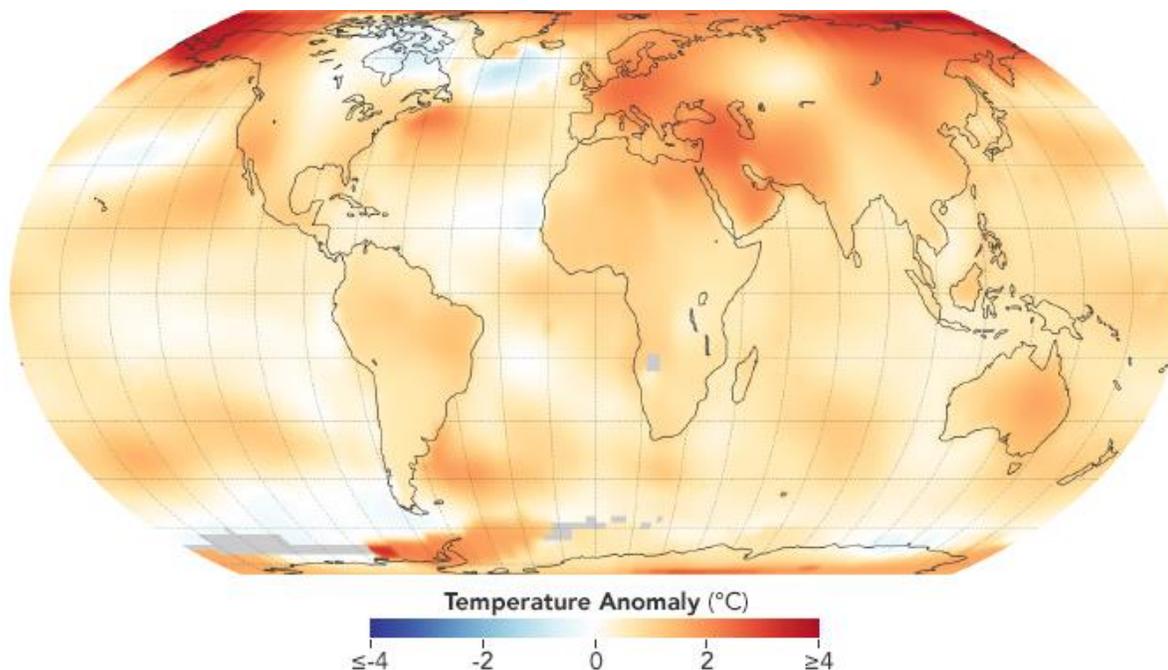


Figura 2.11. Mapamundi del Calentamiento Global (NASA Oficial, 2019).

El Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés, fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica

Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Su objetivo es proporcionar evaluaciones respecto a la comprensión del cambio climático (IPCC, 2007), siendo capaz de brindar asesoría científica y de proponer políticas con potencial de mitigar parte de los efectos, brinda en sus informes actualizaciones sobre la variación del estado del clima identificable en las variaciones de sus componentes. (History of the IPCC, 2020).

El IPCC (2019) en su comunicado de prensa en Mónaco (Figura 2.12), hace evidente que el aumento global de 1°C respecto a los niveles preindustriales tendrá efectos sobre todo en la criósfera y los océanos. Del presente al año 2100 se podría llegar a registrar una elevación de entre 30 cm y 60 cm, la subida del nivel de las aguas podría ser del orden de 60 a 110 cm, “la acidificación y el calentamiento de los océanos, la pérdida de oxígeno y los cambios en el suministro de nutrientes ya afectan a la distribución y abundancia de la vida marina en zonas costeras, alta mar y en el fondo marino” (IPCC, 2019).

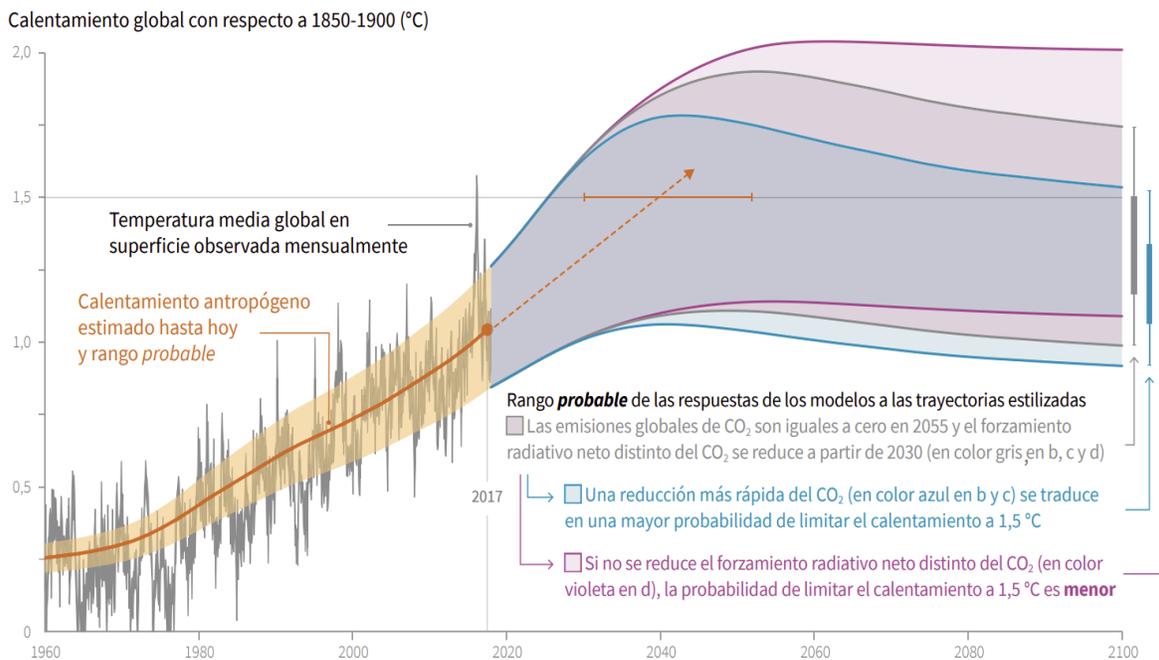


Figura 2.12. Calentamiento global y predicciones (IPCC, 2019)

La influencia que ha ejercido el clima sobre el desarrollo e historia de la humanidad es evidente, se considera que las variaciones climáticas tienen un papel fundamental en el desarrollo de los acontecimientos históricos. Por ejemplo, el periodo cálido óptimo del neolítico permitió el surgimiento y desarrollo de la agricultura del sur de Palestina hasta Mesopotamia (Pascal, 2005).

2.3 Servicios ecosistémicos

La humanidad obtiene numerosos servicios provenientes de los ecosistemas, así como de la biodiversidad que albergan. Los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios que la sociedad obtiene de los ecosistemas (Balvanera y Cotler, 2009; CONANP, 2015). Los servicios ecosistémicos, o ambientales, se clasifican en cuatro grupos: culturales, de regulación, de provisión y de soporte (Figura 2.13).

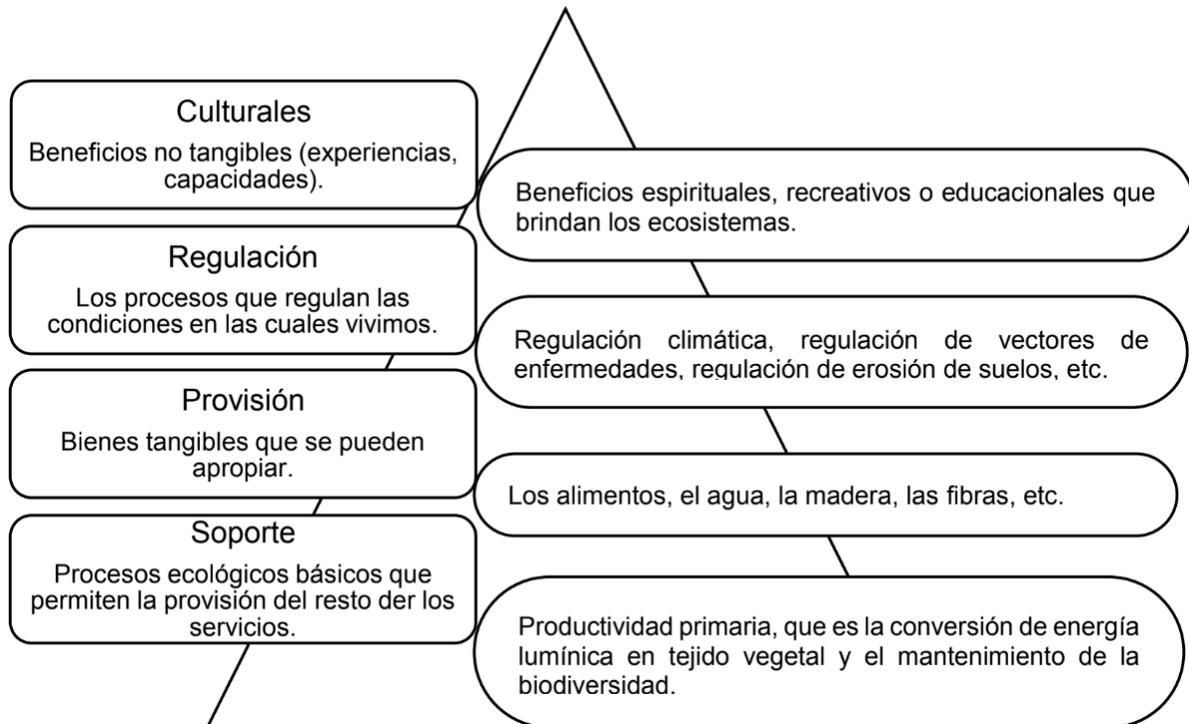


Figura 2.13. Servicios Ecosistémicos. Tomado y modificado (Balvanera y Cotler, 2009).

La importancia real de los servicios ecosistémicos había sido subvalorada hasta hace pocas décadas para los inversionistas y las políticas públicas. La correcta valoración económica de estos servicios otorga claridad a los tomadores de decisiones. Los ejercicios de valoración económica nos demuestran los aportes de la naturaleza a la economía y desarrollo, además de constituir un potente aliado para la conservación (Reid, 2015).

En el país el interés por los servicios ambientales y por crear esquemas de pago surge con el estudio de país llevado a cabo por la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO) en 1998, posteriormente se iniciaron los primeros esquemas de pagos por servicios ambientales (Balvanera y Cotler, 2009).

Dentro de los de los servicios ambientales que provienen de los bosques con funciones de regulación, están incluidos la mitigación de los efectos del cambio climático, la generación de oxígeno, protección de la biodiversidad, retención del suelo, refugio de fauna silvestre, entre otros (CONAFOR, 2013). La captura de carbono es un servicio relacionado con las funciones de regulación ambiental (Ordóñez, 1999).

Los bosques son fundamentales en la regulación de los flujos hídricos ya que albergan un porcentaje importante de la biodiversidad del mundo y almacenan enormes cantidades de carbono (Pagiola *et al.*, 2003). Son considerados sumideros de carbono, debido a su gran capacidad de captura y almacenamiento (Maser, 1996; Ordóñez, 1998; IPCC, 2003, IPCC, 2006).

2.4 Parámetros utilizados

Durante el proceso de estimación de contenido y captura potencial de carbono, se utilizaron ecuaciones alométricas, las cuales funcionan con base en patrones de crecimiento y proporciones de las partes; relacionando variables como el contenido de carbono, biomasa, altura, área basal, entre otras. Son herramientas matemáticas para conocer distintos parámetros de interés a partir del diámetro normalizado; son generadas a partir de análisis de regresión. Para integrar las ecuaciones se requiere de un muestreo destructivo de cierto número de árboles para relacionar dichas variables. (Brown, 1997; Araujo *et al.*, 1999; Francis, 2000; Rüginitz *et al.*, 2009; Díaz, 2014). A continuación, se definen los parámetros usados durante la estimación del contenido y captura potencial de carbono:

Diámetro normalizado (DN): También llamado diámetro a altura de pecho, debido a que la medición se realiza a 1.3 m de altura. Es la única variable independiente y primer parámetro a obtener. Sus unidades son de distancia, comúnmente centímetros.

Área basal: Se considera un referente del espacio horizontal ocupado (Valenzuela, 2001; Galeana, 2008). Se usa para estimar el volumen del fuste, es un indicador de cobertura en un bosque (Galeana, 2008); se le estima en función del diámetro normalizado, con base en propuestas presentadas en trabajos anteriores (Mostacedo y Fredericksen, 2000). Sus unidades son de distancia al cuadrado.

Altura: Estimada con base en relaciones alométricas en función del diámetro normalizado, el método utilizado es similar en trabajos anteriores (Ayala *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2010). Se usa para la estimación del volumen, sus unidades son de distancia.

Volumen: Se considera como homólogo a las existencias reales, el volumen que se obtiene es el del tronco del árbol. Sus unidades son de distancia al cubo.

Biomasa aérea: Se puede considerar como la masa seca libre de agua. En este trabajo se contempla únicamente la biomasa de la parte aérea del árbol, es decir el tronco. En su estimación se utiliza la densidad de la madera, se usa el valor propuesto del inifap para *P. hartwegii* de 0.44 g/cm^3 (Ordóñez *et al.*, 2015b). Es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo (Brown, 1997). Sus unidades son de masa.

Contenido de carbono: Brown (1997) señala que el almacenamiento de carbono depende de la productividad primaria neta, asegurando una concentración de carbono en el tejido vegetal de alrededor de 50 %. Sus unidades son de masa.

Contenido de CO_{2e}: Se ocupa como unidad de medida del volumen y del potencial de calentamiento global que tienen otros gases de efecto invernadero respecto al CO₂ (OBCCD, 2022). Calculado al multiplicar el contenido de carbono (Mg C ha^{-1}) por la relación del peso molecular del dióxido de carbono (CO₂ 44) dividido entre el peso molecular del carbono (C 12), es decir 44/12 (IPCC, 2006). Sus unidades son de masa.

Incremento Corriente Anual (ICA): Se define como el aumento volumétrico anual en el que el CO₂ se incorpora a la biomasa, el cual está determinado por factores como la especie, edad, tipo de suelo, humedad, competencia, entre otros factores bióticos y abióticos que definen la calidad del sitio (Ordóñez, 2008b). Sus unidades son de volumen sobre tiempo.

Captura potencial de CO_{2e}: Entendida como la incorporación promedio anual de dióxido de carbono a ecosistemas forestales. Sus unidades son de masa sobre tiempo.

Captura potencial de carbono: Se entiende como la incorporación anual promedio de carbono a la biomasa forestal. Se expresa como Mg C año^{-1} . Sus unidades son de masa sobre tiempo.

Densidad de la madera: Es la masa por volumen de la madera de un árbol, tiene unidades de masa entre distancia al cubo. Químicamente, la madera de coníferas y latifoliadas está compuesta elementalmente por carbono (50%), oxígeno (43%), hidrógeno (6%), nitrógeno (8%) y de sustancias minerales (0.2%) (CONAFOR-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011 en Díaz, 2014). Sus unidades son de masa entre distancia al cubo.

Coeficiente mórfico: El coeficiente mórfico es la relación entre el volumen del tronco y el producto de su altura por el área basimétrica (SECF, 2005). Se compara el tronco con un cilindro cuyo volumen equivale a 1 y el volumen del tronco representa una fracción del volumen del cilindro. Sus unidades son porcentuales.

2.5 Justificación

Este trabajo se justifica a partir de la necesidad de conocer el contenido y captura potencial de carbono en un bosque de *P. hartwegii* de la Ciudad de México que pertenece al suelo de conservación, aportando de esta manera conocimiento biológico clave para la realización de acciones de uso sustentable encaminadas a la conservación forestal de la región.

Ante la crisis climática, las acciones de conservación y uso sustentable de los recursos forestales, coordinadas a distintos niveles de toma de decisiones, pueden ayudar a mitigar los efectos del cambio climático, en este sentido, los mercados de carbono son importantes debido a que son mecanismos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sus efectos sobre el clima, y además promueven la conservación forestal.

Los beneficios más tangibles de los mercados de carbono son la compensación de emisiones de gases de efecto invernadero de personas, comunidades, empresas, países y la contribución al desarrollo sustentable a través de la mitigación a los impactos ambientales provocados por el cambio climático.

Capítulo 3

OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio de caso es: “estimar el contenido y captura potencial de carbono en la biomasa aérea de *Pinus hartwegii*, así como su valoración económica, en el bosque del Parque Ecoturístico El Tepozán, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, México”, a partir del cual, se derivan los siguientes objetivos particulares:

- a) Determinar la superficie total del sitio de estudio, y de ésta, determinar el área con cobertura vegetal arbórea de *P. hartwegii*;
- b) Identificar la densidad arbórea para cada clase diamétrica;
- c) Estimar el volumen total de la biomasa aérea;
- d) Realizar una comparación de metodologías que permitan estimar biomasa aérea y contenido de carbono;
- e) Estimar el potencial de captura de CO_2e y realizar la valoración económica correspondiente, y
- f) Realizar una estimación de la captura potencial de CO_2e a un plazo de 5 y 10 años.

Capítulo 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se indaga sobre el sitio de estudio, se describe a la especie *P. hartwegii*, y se detalla el procedimiento de la estimación del contenido y captura potencial de carbono.

4.1 Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en un predio comunitario autodenominado: “Parque Ecoturístico El Tepozán”, ejido San Nicolas Totolapan, alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, México. Se encuentra a una altitud de 2,876 msnm, con coordenadas: 19° 25´76.4” Norte y 99° 24´03.3” Oeste. El acceso al parque es por la carretera Picacho-Ajusco con número 136, kilómetro 10.9.

El Parque nació en 2005 por iniciativa de los pobladores de San Andrés Totoltepec, destacándose la presencia de Maximiliano Álvarez Pantoja, actualmente el parque es manejado por una cooperativa. El objetivo inicial del parque es fortalecer la frontera con la mancha urbana. En su origen contó con un financiamiento de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, el cual fue promovido por Claudia Sheinbaum desde el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Rudiño, L. 2011).

El ejido de San Nicolas Totolapan tiene una superficie de 2,303 hectáreas, de las que 1,700 hectáreas son ocupadas por bosques templados. Su gradiente altitudinal va de los 2,700 msnm a los 3,740 msnm. Ocupa un area significativa de la conformación boscosa del sur de la cuenca de México, la cual es considerada como suelo de conservación (SMA, 2016).

El Parque Ecoturístico el Tepozán se limita a una porción periférica de la sierra Ajusco-Chichinautzin, la cual es considerada región prioritaria por la CONABIO (1998), esto es debido a las características ambientales que la componen, sumado a un marcado gradiente de ecosistemas que se originan debido a la diferencia altitudinal. Dicha sierra comprende dos áreas naturales protegidas, el parque nacional cumbres del Ajusco y el corredor biológico Ajusco-Chichinautzin.

La sierra Ajusco-Chichinautzin posee una extensión de 1,261 km², presenta diferentes estados sucesionales de bosques y matorrales, funciona como corredor biológico ya que mantiene procesos ecológicos de transición entre las regiones

biogeográficas neártica y neotropical, y asegura la continuidad de los procesos naturales funcionando como barrera al avance de la urbanización. Dichas condiciones favorecen la riqueza específica y la presencia de endemismos, especialmente de vertebrados, plantas vasculares y hongos (CONABIO, 1998).

Respecto a la distribución del Ajusco, es un cerro aislado de 1,700 metros de altura desde el nivel de la cuenca de México y de casi 4000 msnm, con base casi circular que alcanza en su superficie de nueve kilómetros de diámetro (Vargas, 1997).

4.1.1 Clima

La CONABIO (1998), caracteriza el clima del corredor Ajusco-Chichinautzin según la clasificación de Köppen en tres tipos de clima templado con invierno¹⁰ seco (Cw):

1) Cb'(w2): templado semifrío, temperatura media anual de 5°C y 12°C, temperaturas del mes más frío (enero) entre -3°C y 18°C, no más de tres meses con temperatura mayor a 10°C, subhúmedo, con precipitación anual entre 200 a 1,800 mm, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual. Representación superficial del 71%;

2) C(w2): templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, con temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, y temperatura del mes más caliente (mayo) con menos de 22°C, subhúmedo, con precipitación anual entre 200 y 1,800 mm, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual. Representación superficial del 16%, y

3) C(w2)x': templado con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, y del mes más caliente con menos de 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm, lluvias de verano mayores al 10.2% anual. Representa el 13 % de la superficie total.

4.1.2 Geología

La sierra del Ajusco-Chichinautzin está conformada por un conjunto de geoformas, tales como laderas, cañadas y conos volcánicos; de los cuales destacan el Xitle, el volcán Ajusco, el Chichinautzin y el volcán Tláloc. El Volcán Ajusco surgió hace 3 millones de años, es un volcán compuesto y representa la

¹⁰ Considerando al intervalo del invierno desde finales de noviembre hasta mediados de febrero.

transición entre vulcanismo poligenético siendo este monogenético (CONABIO, 1998), está contenido en la porción central de la “Franja Volcánica Trans Mexicana” (Figura 4.1); hacia la porción centro oriental, se sitúa en la cuenca del valle de México, el volcán Ajusco y la Sierra de las Cruces, las cuales, delimitan a la cuenca en la parte poniente y sur poniente la sierra Chichinautzin la cual presenta una estructura morfológica con límites espaciales precisos (Romero, 1998; Macías, 2005; SMA, 2016).

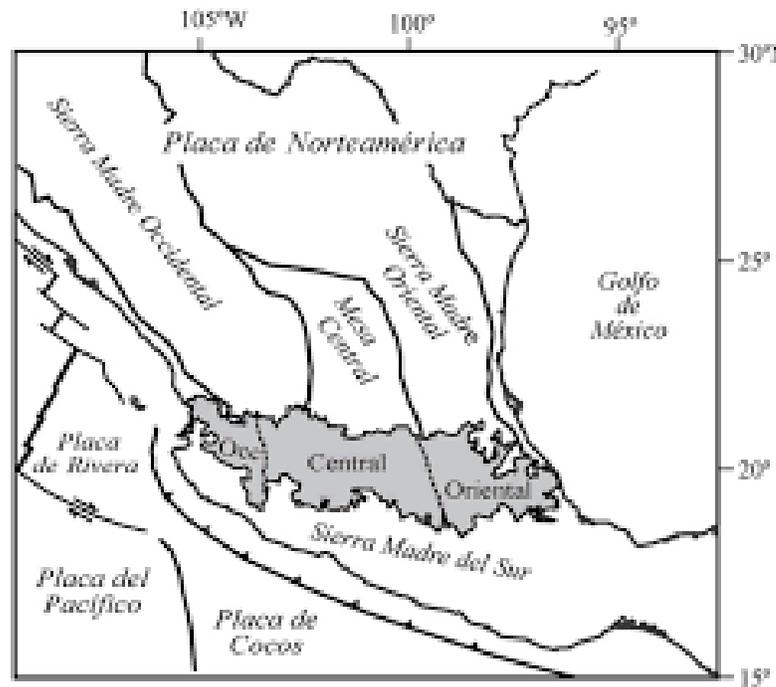


Figura 4.1. Ubicación de la Franja Volcánica Transmexicana y sus sectores (sombreado), principales provincias geológicas, y placas tectónicas (Gómez *et al.*, 2005).

El volcán Ajusco posee un substrato de origen volcánico muy poroso, lo que provoca que las aguas se filtren formando manantiales y ríos subterráneos para aparecer en Xochimilco, Nativitas y Fuentes Brotantes. Actualmente esos caudales han disminuido o desaparecido (Vargas, 1997). En un estudio combinado K-Ar y paleomagnetismo de la Sierra de las Cruces y la cuenca de México se reporta una edad aproximada de 0.39 ± 0.15 millones de años (Mora *et al.*, 1992).

4.1.3 Edafología

Es un suelo 100% de Andosol úmbrico (Clasificación FAO-Unesco, 1989), que presenta proporciones altas de aluminio y hierro en la fracción de tierra fina, con una alteración de fosfatos hasta 35 cm de profundidad. “El subtipo úmbrico tiene una consistencia untuosa y una textura franco-limosa o muy fina y no se satura de agua en ninguna época del año; posee captura de carbono y la filtración de los mantos acuíferos en un horizonte A no muy duro cuando se seca, con

grado de saturación menor de 50% y con relativamente alto nivel de contenido de carbono orgánico y un horizonte B de alteración, color claro y bajo contenido de materia orgánica” (CONABIO, 1998).

4.1.4 Vegetación

La vegetación es considerada como “Bosque de Coníferas y Vegetación inducida” de acuerdo con el INEGI (Serie III) (CONANP, 2020). Establecida en zonas de derrame volcánico, los principales tipos de vegetación y uso de suelo son: bosques de pino (Figura 4.2) (44%); agropecuario y forestal (31%); bosque de oyamel (13%); selva baja caducifolia (6%), y otros (6%) (CONABIO, 1998).

La cobertura vegetal la representan tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo. El arbóreo está constituido por *Pinus hartwegii*, en el estrato arbustivo y el herbáceo destacan la escobilla (*Baccharias conferta*), la jarilla verde (*Senecio salignus*), la jarilla blanca (*Senecio cinerarioides*), la hierba del ángel (*Eupatorium pazcuarensis*), el cardosanto (*Circium ehrenbergii*), la hierba del sapo (*Eryngium columnare*), los jarritos (*Penstemon roseus* y *P. gentianoides*), la hierba del pollo (*Commelina alpestris*) y algunos mirtos azules (especies del género *Salvia*) (CONANP, 2020).



Figura 4.2. Vegetación del Ajusco (Parque El Tepozán, 2020).

La vegetación está representada por las siguientes asociaciones: bosque mixto de *P. hartwegii* y *A. religiosa* (3,500 msnm), bosque de *P. hartwegii* y zacatonal de *M. quadridentada* (3,700 msnm), bosque abierto de *P. hartwegii* y zacatonal de *C. toluensis* y *F. amplissima* (3,900 msnm) (Álvarez, 1989).

4.1.5 Decreto del Parque Nacional Cumbres del Ajusco

Se le considera en la categoría de Parque Nacional por la Comisión Nacional de Áreas Nacionales Protegidas (CONANP) y el gobierno de la Ciudad de México desde 1936, el programa de manejo no ha sido publicado ni elaborado (CONANP, 2020). La superficie total es de 920 hectáreas. El régimen de la tenencia de la tierra es comunal. El artículo primero del decreto del Parque Nacional Cumbres del Ajusco declara que el parque nacional está destinado a la conservación permanente de su flora y fauna (PAOT, 1936; Vargas, 1997).

4.1.6 Aspectos sociales

Los problemas de mayor impacto en el Ajusco son la “degradación de los hábitats debido a la urbanización, fragmentación por la construcción de caminos y autopistas, agricultura intensiva, pastoreo, quema, deforestación, y actividades turísticas” (CONABIO, 1998).

Los efectos más evidentes son la pérdida de la superficie original y la degradación de los hábitats naturales, debido a la urbanización, incendios forestales, deforestación, pastoreo intensivo y a los cambios en la densidad poblacional de Cuernavaca y la CDMX. Existe además presión sobre especies clave debido a la cacería y extracción de plantas (CONABIO, 1998).

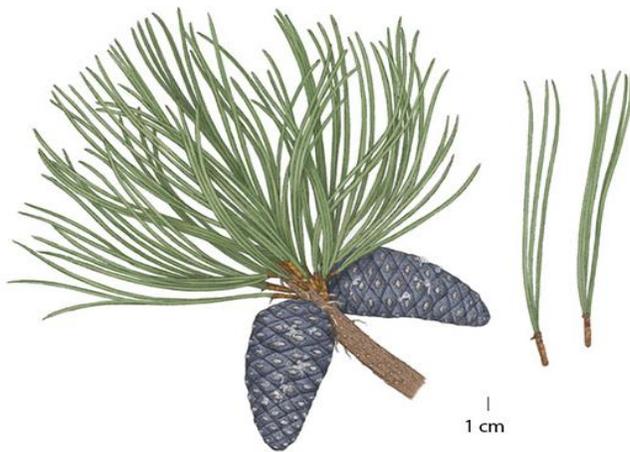
Un factor que ha causado un fuerte daño es el exceso de contaminantes, que, al no poder atravesar la serranía en días sin viento estos se acumulan en las partes altas de los bosques y los deterioran, provocando la muerte de flora y fauna presente. Los bosques de la cima del Macizo Central (3,600-3,937 msnm) han desaparecido y en su lugar abunda un pastizal amacollado. En parte del bosque de *A. religiosa* (3,100-3,600 msnm) un porcentaje elevado de árboles jóvenes del sotobosque están completamente secos, en el futuro no habrá árboles que sustituyan a los viejos (Álvarez, 1989).

Respecto al bosque de *P. hartwegii*, es posible que la población en el límite superior del cerro del Ajusco sea la más deteriorada, ya que ha sido desplazada por pastizales. Los incendios y el sobrepastoreo unen sus efectos ya que las ovejas que alcanzan a subir se alimentan de los brotes de las gramíneas cuyo desarrollo y crecimiento es estimulado por el fuego (Álvarez, 1989).

4.2 *Pinus hartwegii* Lindl.

Este pino se puede describir como un árbol de fuste color marrón oscuro a gris, de hasta 128 cm de diámetro normalizado y 31 metros de altura, su corteza es gruesa, rugosa y escamosa; la cual se compone de placas que están separadas

por profundos surcos y que a su vez dichas placas obedecen a un gradiente de tamaños. Las ramas son robustas, rígidas y curvadas hacia arriba con nudos de hojas persistentes; las hojas son rígidas de 10 a 17 cm, pueden ser curvas o rectas y tienen forma de aguja, están agrupadas de 3 a 6 en fascículos; los conos de apariencia sésil en verticilos, las escamas de los conos abren pronto para liberar a las semillas que son aladas (Figura 4.3 y Figura 4.4) (Farjon y Styles, 1997).



Su distribución se ha asociado a islas biogeográficas que se distinguen por su altura; las poblaciones están presentes en países como Guatemala, Honduras, México y El Salvador, con elevaciones aproximadas desde 2,200 msnm hasta 4,300 msnm, pudiendo soportar temperaturas de hasta -12.1°C (Earle, 2020).

Figura 4.3. Conos y hojas de *P. hartwegii*, (tomado y modificado de Strieby, 2020).



Figura 4.4. Árboles de *P. hartwegii*. (tomado y modificado de Strieby, 2020).

4.3 Método

La estimación del contenido y captura potencial de carbono en el bosque del Parque Ecoturístico El Tepozán comenzó con un acercamiento a la comunidad mediante un diálogo directo con la autoridad del parque, que en aquel momento (2005) era Maximiliano Álvarez Pantoja (Rudiño, L. 2015), con la intención de establecer un canal formal de comunicación e intercambio. En mutuo acuerdo se procedió a realizar las actividades descritas a continuación.

4.3.1 Estimaciones del área del sitio de estudio

En la estimación del área total se empleó el software Google Earth Pro, con el que se establecieron los límites del sitio de estudio, obteniendo el área total. A partir de esta estimación, usando el software Arcview 10, se seleccionaron mediante polígonos las zonas donde no se observaron copas de árboles y se restaron de la superficie total, obteniendo el área con cobertura vegetal arbórea.

4.3.2 Selección de puntos de muestreo y colecta de datos

Posteriormente al establecimiento y delimitación del área del sitio de estudio, se utilizó un diseño de muestreo sistemático. Se comenzó por sobreponer una cuadrícula en un sistema de coordenadas geográficas, cada cuadro de 100 metros por 100 metros, y se enumeraron los cuadros donde es visible la cubierta vegetal arbórea. Se seleccionaron al azar siete de esos cuadros como puntos de muestreo utilizando una tabla de números aleatorios, finalmente los puntos de muestreo se ubicaron en el terreno con ayuda de un GPS (Figura 4.5). Cada punto de muestreo es considerado como una unidad de monitoreo permanente.

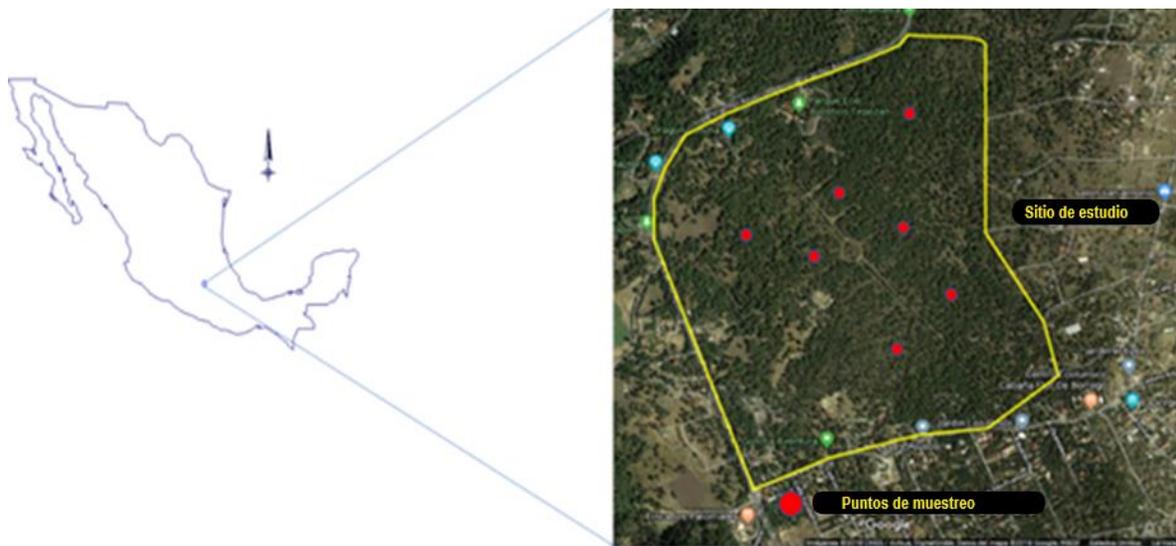


Figura 4.5. Sitio de estudio y puntos de muestreo (Google Earth Pro, 2020).

La recolecta de datos fue esencialmente el registro del perímetro del tronco a 1.3 metros de altura de todos los ejemplares de *P. hartwegii* en cada punto de muestreo establecido. La medición fue llevada a cabo mediante cintas métricas y se registró en formatos preestablecidos. Tales actividades fueron llevadas a cabo por parte del personal de la organización civil SACC (Servicios Ambientales y Cambio Climático) durante jornadas de trabajo.

A partir de los datos recolectados en campo se generó una base de datos utilizando el software de cálculo Microsoft-Excel, con el cual se calculó, inicialmente el valor del diámetro normalizado de cada árbol a partir del perímetro registrado dividiéndolo entre el valor de π (3.1416...). La intensidad de muestreo se determinó con base en la relación de la superficie muestreada respecto a la superficie total. La intensidad de muestreo usada por diferentes autores sugiere que para un inventario forestal se muestree al menos el 1 o 2 % de la superficie total arbolada (Cochran, W. 1980; Velasco *et al.*, 2005; Galeana *et al.*, 2013; Torres *et al.*, 2010; Ordóñez *et al.*, 2015a).

4.3.3 Densidad arbórea por clase diamétrica

Usando los valores del diámetro normalizado, se definieron seis clases diamétricas estableciendo intervalos de diez centímetros, excepto la última clase diamétrica, ya que el intervalo se extiende más allá de los diez centímetros (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Clases diamétricas e intervalos.

C. D.	DN (cm)
I	1 - 10.9
II	11 - 20.9
III	21 - 30.9
IV	31 - 40.9
V	41 - 50.9
VI	51 - 60.9...

Para estimar el número de árboles por clase diamétrica se ordenaron los valores de los diámetros normalizados de todos los árboles de menor a mayor, y en una columna adjunta se numeraron los árboles de cada clase diamétrica obedeciendo los intervalos establecidos.

La densidad arbórea por punto de muestreo se determinó directamente del inventario realizado, caracterizando a cada punto de muestreo dependiendo del número de árboles presentes. La densidad arbórea se caracterizó en: abierta (<100), semidensa (<200) y densa (<300).

4.3.4 Estimación de parámetros

Los cálculos correspondientes a la estimación de cada parámetro se realizaron en una hoja de cálculo. Se comenzó por disponer los valores de los diámetros normalizados en una misma columna y asignando una columna adjunta conforme se hizo cada estimación. A continuación, se explica el procedimiento:

1) **Área basal.**

$$AB = \pi \left(\frac{DN^2}{4} \right),$$

AB= área basal (m²), $\pi= 3.1416$ y $DN^2=$ diámetro normalizado (m²).

2) **Altura.**

$$h = 3.4698(\ln DN) + 2.1803,$$

h= altura (m) y $\ln DN=$ logaritmo natural del diámetro normalizado (cm).

3) **Volumen.**

$$V = AB * h * 0.7,$$

V= volumen (m³), AB= área basal, h= altura (m) y 0.7= coeficiente mórfico¹¹.

4) **Biomasa aérea.**

$$Ba = V * \delta,$$

Ba= Biomasa aérea (kg), V= Volumen (m³) y $\delta =$ Densidad de la madera (kg/m³), (Ordóñez et al., 2015b).

5) **Contenido de carbono.** Calculado a partir de la siguiente ecuación usada en estudios similares (Galeana, 2008),

$$CC = Ba * CC,$$

CC=contenido de carbono (Mg C), Ba= Biomasa aérea (Mg) y CC= 0.5 (concentración de carbono en biomasa (IPCC, 2003 y 2006)).

11 El coeficiente mórfico es la relación entre el volumen del tronco y el producto de su altura por el área basimétrica. (SECF, 2005). Se puede comparar el tronco con un cilindro cuyo volumen equivale a 1 y el volumen del tronco representa una fracción de este cilindro.

- 6) **Contenido de CO₂e.** La estimación del dióxido de carbono equivalente se llevó a cabo con base en propuestas de trabajos anteriores (García, 2011);

$$CO_2e = CC \left(\frac{44}{12} \right),$$

CO₂e= dióxido de carbono equivalente (Mg CO₂e) y CC= contenido de carbono (Mg C).

7) **Captura potencial de CO₂ e.** Para este estudio de caso, se obtuvo un crecimiento diferencial (incremento de diámetro y altura) obtenido con base en los resultados de un trabajo con un bosque similar a éste (Ordóñez *et al.* 2016), el cual se multiplica por el valor del contenido de dióxido de carbono equivalente. La captura potencial de CO₂e estimado para este estudio de caso es válido solo para este bosque debido a que tiene un crecimiento muy particular. El valor resultante es expresado como Mg CO₂ e año⁻¹.

8) **Captura potencial de Carbono.** Se estimó a partir de un modelo utilizado en numerosos trabajos similares (Galeana, 2008; Calvo, 2019).

$$PCC = (CPCO_2e)(\delta)(0.5),$$

PCC= Potencial de Captura de Carbono al año (Mg C año⁻¹), CPCO₂e= Captura potencial de CO₂e (Mg CO₂e año⁻¹), δ= densidad de la madera de *P. hartwegii* (Mg/m³) (Ordóñez *et al.*, 2015b) y 0.5= Concentración de carbono en biomasa (%) (IPCC, 2003 y 2006).

Para obtener la estimación total de cada parámetro se agruparon los datos del DN por punto de muestreo y se sumaron, posteriormente se realizó un promedio de la suma de cada punto de muestreo, y esa cantidad se multiplicó por el total de la superficie arbórea previamente estimada. Esta operación se omitió con el parámetro de la altura.

4.3.5 Método alternativo de estimación de biomasa y contenido de carbono

Se utilizó el modelo propuesto por (Terr y Korzukhin, 1997). El modelo es dependiente del diámetro normalizado y se expresa de la siguiente manera:

$$Y = bX^k$$

Y= Biomasa o Carbono (Kg), X= Diámetro normalizado (cm) y, b y k= parámetros del modelo, obtenidos por regresión lineal mediante el método de mínimos

cuadrados (Carrillo *et al.*, 2016). Los valores de los parámetros del modelo fueron calculados anteriormente y usados en un bosque de *P. hartwegii* (Anzures *et al.*, 2016).

1) **Biomasa aérea.**

$$Ba = 0.0635 * DN^{2.4725}$$

Ba= Biomasa aérea (kg) y *DN*= diámetro normalizado (cm).

2) **Contenido de carbono.**

$$CC = 0.0309 * DN^{2.4722}$$

CC= contenido de carbono (Mg C) y *DN*= diámetro normalizado (cm).

4.3.6 Valoración económica

La valoración económica consistió en una investigación de grupos, organizaciones y empresas que participen en el mercado de bonos de carbono. Los resultados mostrados se consultaron en el informe anual de Forest Trends (Forest Trends, 2018; Dnofrio *et al.*, 2021), y la valoración del proyecto “Neutralízate”, el cual opera a través de Pronatura México A.C., (Pronatura, 2019).

4.3.7 Estimación de la captura potencial de CO₂e a 5 y 10 años

A partir del total de la captura potencial de CO₂e, el resultado se multiplicó por 5 y 10 respectivamente, con lo que se cumple el último objetivo particular de este estudio de caso.

Capítulo 5

RESULTADOS

Se describen los resultados obtenidos en el mismo orden en que se presentan los objetivos particulares:

El primer objetivo particular consiste en la determinación del área del sitio de estudio y de la superficie de muestreo. La estimación del área total resultó en 125 hectáreas, de las cuales, se estimó el área con cobertura vegetal arbórea resultando en 112.36 hectáreas, de las que se muestrearon siete hectáreas. Con estos datos se determinó que la intensidad de muestreo es de 6.2%.

Durante el muestreo se registró el perímetro del tronco a 1.3 metros de altura de un total de 1207 árboles de la especie *P. hartwegii*. Usando los valores ordenados del diámetro normalizado de todos los pinos se determinó la densidad arbórea por clase diamétrica. Al obtener estos datos se cumple con el segundo objetivo particular de "identificar la densidad arbórea para cada clase diamétrica" (Figura 5.1).

La distribución de tamaños de los troncos es "gaussiana" o normal, las clases diamétricas III y IV concentran el 77% de los pinos muestreados, dichas clases corresponden al intervalo de 21 cm a 40.9 cm.

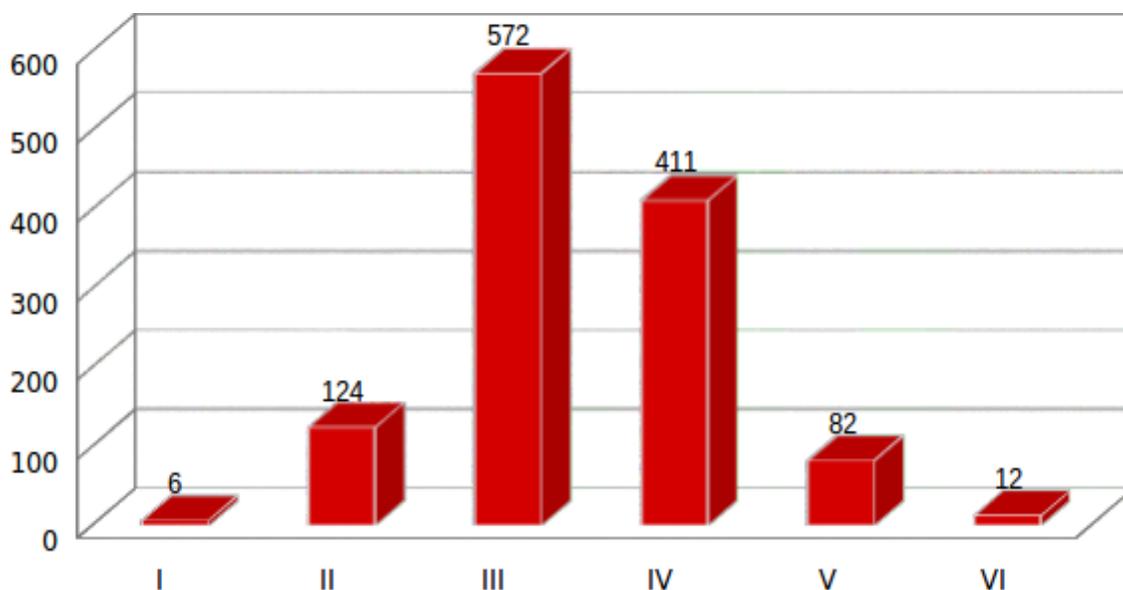


Figura 5.1. Densidad arbórea por clase diamétrica.

Además, con fines comparativos, se obtuvo la densidad arbórea por punto de muestreo (Tabla 5.1). Se puede observar a los puntos de muestreo uno y tres como los más densos, le siguen los puntos dos, cuatro y cinco como semidensos, y finalmente los puntos seis y siete representan un bosque abierto de *P. hartwegii*.

Tabla 5.1. Densidad arbórea por punto de muestreo.

Puntos de muestreo	Número de árboles	Densidad arbórea
1	250	<i>P. hartwegii</i> denso
2	192	<i>P. hartwegii</i> semidenso
3	273	<i>P. hartwegii</i> denso
4	137	<i>P. hartwegii</i> semidenso
5	185	<i>P. hartwegii</i> semidenso
6	79	<i>P. hartwegii</i> abierto
7	91	<i>P. hartwegii</i> abierto

De aquí en adelante los resultados se muestran para cada punto de muestreo, para el total de la superficie con representación arbórea, y para el promedio de este.

El tercer objetivo particular exige determinar el volumen total de la biomasa aérea del arbolado. Para lograrlo, se calculó previamente el área basal y la altura. Adicionalmente, con fines comparativos, se obtuvo el diámetro normalizado promedio. La información obtenida se muestra en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2. DN promedio, área basal, altura promedio y volumen.

Puntos de muestreo	DN promedio (cm)	Área basal (m ²)	Altura promedio (m)	Volumen (m ³)
1	31.23	20.15	14.02	217.40
2	31.14	15.37	14.01	165.67
3	28.52	18.37	13.69	193.87
4	31.53	11.49	14.03	125.39
5	29.34	13.40	13.77	143.34
6	30.50	6.25	13.86	67.68
7	27.91	6.03	13.57	64.05
Promedio	30.02	13.01	13.88	139.63
Total	-	1,462.41	-	15,689.28

El cuarto objetivo particular consiste en realizar una comparación de metodologías que permitan estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono (Tabla 5.3). El método empleado requiere de la estimación previa del área basal, altura y volumen, a diferencia del método usado por Anzures *et al.*, (2016).

Tabla 5.3. Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono por dos métodos.

Puntos de muestreo	Método empleado		Anzures <i>et al.</i> , 2016	
	Biomasa (Mg)	CC (Mg C)	Biomasa (Mg)	CC (Mg C)
1	95.65	47.82	86.28	41.94
2	72.89	36.44	65.65	31.91
3	85.30	42.65	75.34	36.62
4	55.17	27.58	50.51	24.55
5	63.07	31.53	56.50	27.46
6	29.78	14.89	27.02	13.13
7	28.18	14.09	25.10	12.20
Promedio	61.43	30.71	55.20	26.83
Total	6,903.28	3,451.64	6,202.22	3,014.90

La información de la tabla anterior sirve como referente para realizar la comparación del contenido de carbono con otros estudios de caso. Se muestra gráficamente en la Figura 5.2, la estimación de la biomasa aérea por punto de muestreo (Mg ha^{-1}), la cual es obtenida por el método propuesto y el método usado por Anzures *et al.*, (2016). Se puede observar una estimación mayor de la biomasa aérea mediante el método propuesto.

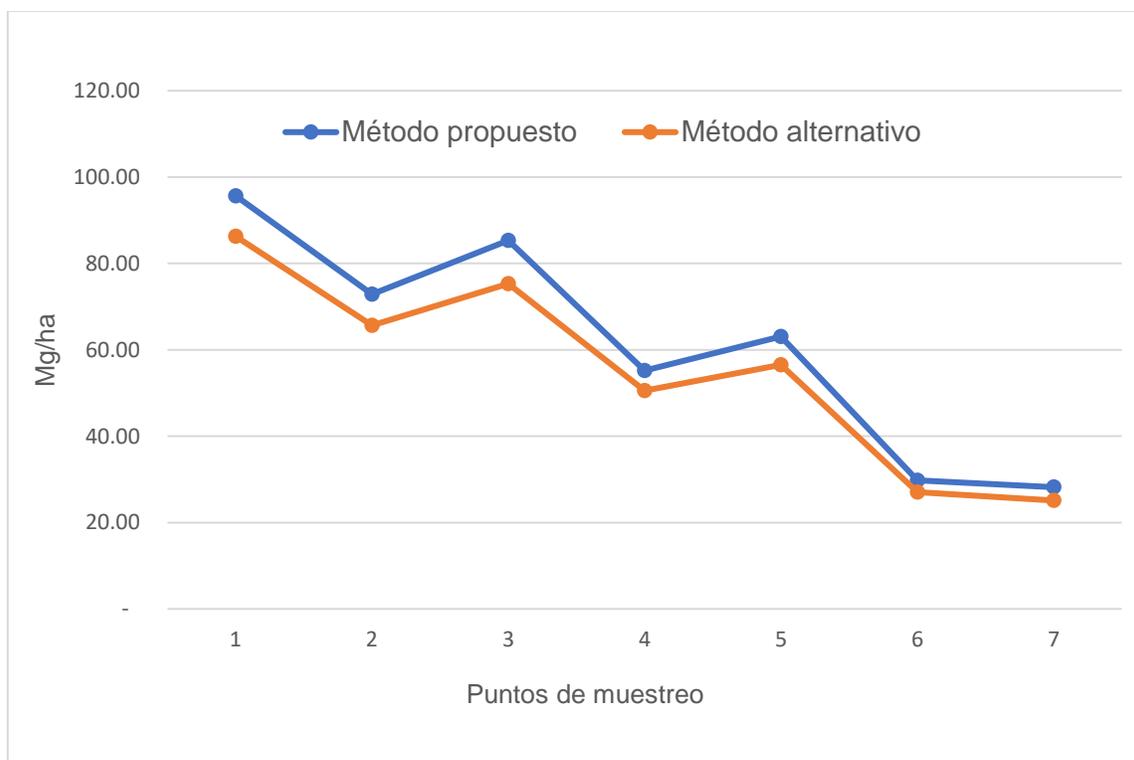


Figura 5.2. Estimación de biomasa aérea por dos métodos (método alternativo usado por Anzures *et al.*, 2016).

A partir del contenido de carbono, se logró determinar el contenido y captura potencial de CO₂e (Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹), y posteriormente la captura potencial de carbono (Mg C ha⁻¹ año⁻¹) (Tabla 5.4). Esta información sirvió como referente para realizar la valoración económica.

Tabla 5.4. Contenido de CO₂e, captura potencial de CO₂e y captura potencial de carbono.

Puntos de muestreo	Mg CO ₂ e	Mg CO ₂ e año ⁻¹	Mg C año ⁻¹
1	175.37	3.50	0.77
2	133.64	2.67	0.58
3	156.39	3.12	0.68
4	101.14	2.02	0.44
5	115.63	2.31	0.50
6	54.59	1.09	0.24
7	51.67	1.03	0.22
Promedio	112.63	2.25	0.49
Total	12,656.02	253.12	55.68

Posteriormente, se realizó la valoración económica de la captura potencial de carbono (Mg C año⁻¹) y de CO₂e (Mg CO₂e año⁻¹). Dicha valoración se obtuvo con base a la retribución propuesta por parte de las plataformas; Neutralízate, la cual valora cada Mg CO₂e año⁻¹ en 10.00 USD (Pronatura, 2019), y Forest Trends que valora cada Mg CO₂e año⁻¹ en 3.13 USD (Forest Trends, 2018; Dnofrio *et al.*, 2021). La valoración de la captura potencial de carbono se realizó con base a la retribución propuesta de la plataforma Neutralízate, la cual valora cada Mg C año⁻¹ en 36.66 USD (Pronatura, 2019). La información es mostrada en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5. Valoración económica.

Puntos de muestreo	Mg C año ⁻¹	Neutralízate (USD)	Mg CO ₂ e año ⁻¹	Forest Trends (USD)	Neutralízate (USD)
1	0.77	28.29	3.50	10.97	35.07
2	0.58	21.56	2.67	8.36	26.72
3	0.68	25.23	3.12	9.79	31.27
4	0.44	16.31	2.02	6.33	20.22
5	0.50	18.65	2.31	7.23	23.12
6	0.24	8.80	1.09	3.41	10.91
7	0.22	8.33	1.03	3.23	10.33
Promedio	0.49	18.17	2.25	7.05	22.52
Total	55.68	2041.84	253.12	792.27	2,531.20

Hasta este punto se cumplió con el objetivo particular de realizar la valoración económica de la captura potencial de CO₂e, y el objetivo general de realizar una valoración económica derivada del servicio ambiental de captura de carbono.

Finalmente, se realizó una estimación de la captura potencial de CO₂ e (Mg CO₂e año⁻¹) a 5 y 10 años (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Captura potencial de CO₂e a 5 y 10 años.

Puntos de muestreo	Mg CO ₂ e año ⁻¹ (5 años)	Mg CO ₂ e año ⁻¹ (10 años)
1	17.53	35.07
2	13.36	26.79
3	15.63	31.27
4	10.11	20.22
5	11.56	23.12
6	5.45	10.91
7	5.16	10.33
Promedio (MgCO ₂ e ha ⁻¹ año ⁻¹)	11.26	22.52
Total (MgCO ₂ e año ⁻¹)	1,265.60	2,531.20

Con la información del cuadro anterior, se cumple el último objetivo particular de realizar una estimación de la captura potencial de CO₂e para un plazo de 5 y 10 años.

Capítulo 6

DISCUSIÓN

6.1 Procedimiento y resultados

La estimación del área total del Parque Ecoturístico el Tepozán usando el software Google Earth pro se cumple satisfactoriamente, a pesar de que existen incertidumbres asociadas a la destreza motriz y defectos del software. El nivel de detalle requerido para obtener una estimación precisa del área arbolada lo cumple satisfactoriamente la fotointerpretación del software Arcview 10, al ser este es un bosque mono específico de *P. hartwegii* el nivel de detalle requerido es mínimo. En ese sentido los programas usados son adecuados para estudios de caso similares a este, ya que permiten obtener estimaciones relativamente confiables del área de estudio.

El uso de una matriz como método de selección de puntos de muestreo, permite la aleatoriedad suficiente para extrapolar los resultados a la superficie total, sumando que la intensidad de muestreo en este trabajo es del 6.2 %, mucho mayor que la sugerida por distintos autores que sugieren se muestreé el 1% o 2% de la superficie total arbolada (Cochran, 1980; Velasco *et al.*, 2002; Galeana *et al.*, 2013; Torres *et al.*, 2010; Ordóñez *et al.*, 2015a). Es correcto pensar que los datos muestreados se pueden extrapolar con la confianza de ser representativos. Para determinar nuestros parámetros usamos métodos directos combinados con ecuaciones alométricas basadas en el diámetro normalizado (Ayala *et al.*, 2001). Los altos valores del coeficiente de correlación indican que el diámetro normalizado es un parámetro confiable (Avendaño *et al.*, 2009; Jiménez, 2010).

La densidad arbórea por clase diamétrica se acumula mayormente en las clases diamétricas III y IV, correspondientes a los intervalos: 21 cm a 30.9 cm y 31 cm a 40.9 cm, concentrando en estos intervalos el 77% del arbolado muestreado. La densidad arbórea por punto de muestreo refleja que el bosque es multietaneo y está creciendo adecuadamente, presentando más de cinco clases diamétricas con un diámetro normalizado promedio y altura promedio de 30 cm y 13 metros, respectivamente, estos datos muestran que el bosque aún no ha llegado a la madurez de sus dimensiones de hasta 128 cm de diámetro normalizado y 31 metros de altura para *P. hartwegii* (Farjon y Styles, 1997).

La biomasa promedio estimada del bosque por el método propuesto es de 61.43 Mg ha⁻¹, y un total de 6,903.28 Mg, y mediante el método usado por Anzures *et al.*, (2016) se obtiene un promedio de 55.20 Mg ha⁻¹, y un total de 6,202.22 Mg,

la diferencia entre las estimaciones radica en que en el método propuesto incluye la altura como variable, ya que las estimaciones que solo usan el diámetro normalizado corren el riesgo de hacer estimaciones bajas y casi nunca generan sobre estimaciones (Ordóñez *et al.*, 2016). En este estudio de caso únicamente se considera la biomasa del tronco principal, descartando la biomasa del follaje, mantillo, suelo y productos forestales.

La razón por la que se considera únicamente la biomasa del tronco es porque el crecimiento anual de los árboles, también llamado “incremento corriente anual” es un parámetro fundamental para estimar la captura potencial de CO_{2e} y carbono cada año. El crecimiento exponencial de un bosque del género *Pinus* después de 50 años disminuye gradualmente, hasta que la curva de crecimiento decrece y el incremento corriente anual disminuye (Ordóñez, 1999). El estado de madurez actual del bosque permite que el establecimiento de un proyecto de captura de carbono sea oportuno.

La valoración económica resultante de la compensación por captura potencial de CO_{2e} al año (Mg CO_{2e} año⁻¹), es de \$797.27 USD, según la valoración de Forest Trends (Dnofrio *et al.*, 2021), y de \$2,531.20 USD, según la valoración de Neutralízate (Pronatura, 2019). La valoración económica del servicio ambiental de captura de carbono difiere entre países desarrollados, responsables de la mayor parte de las emisiones, y países en vías de desarrollo, siendo estos últimos los que son retribuidos marginalmente (CCA, 2001). La retribución anual podría cubrir parte de los gastos respecto a los insumos básicos por parte del personal del Parque Ecoturístico El Tepozán.

La captura potencial de CO_{2e} al año calculado para el bosque en un lapso de 5 y 10 años es de: 1,265.60 y 2,531.20 MgCO_{2e} año⁻¹ respectivamente. Una buena posibilidad de manejo forestal es el método de árboles padre (Grijpma, 1984), manejando la masa forestal por ciclos de 50 años, con cinco ciclos de corta cada 10 años, de los cuales, las primeras tres son aclareos cumpliendo con la finalidad de redistribuir el volumen del bosque escogiendo a los árboles más saludables y mejor posicionados, la cuarta corta es considerada de regeneración que es esencialmente una cosecha de biomasa forestal para productos maderables, y la corta de liberación consistente en la eliminación de los árboles maduros. El bosque del Parque Ecoturístico El Tepozán es un bosque multietáneo con un crecimiento adecuado, del cual podrían seleccionarse los mejores árboles para considerarse "árboles padre" y seguir este método (Grijpma, 1984).

6.2 Comparación con otros estudios de caso

Se hizo una comparación del contenido de carbono (Mg C ha⁻¹) con estudios de caso similares a este, en la que se puede apreciar la diferencia con otros estudios de caso (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Comparativo de carbono en la biomasa. (Tomado y modificado de Ta, 2018, y Calvo, 2019).

Autor	Bosque	Mg C ha ⁻¹
Ordóñez, 1999.	Coníferas	63
Masera <i>et al.</i> , 2001.	Coníferas	118
Navia y Velarde, 2002.	Coníferas	79
Zamora, 2003.	Coníferas	84
Fragoso, 2003.	Coníferas	69
Ordóñez <i>et al.</i> , 2008c.	Pino	126
Ordóñez <i>et al.</i> , 2008c.	Pino-Encino	115
Ordóñez <i>et al.</i> , 2008c.	Encino	142
Ordóñez <i>et al.</i> , 2008c.	<i>Abies</i>	169
Ordóñez <i>et al.</i> , 2016.	Pino	42
Galeana, 2008.	<i>Abies</i> cerrado	162
Galeana, 2008.	<i>Abies</i> abierto	95
Galeana, 2008.	<i>P. hartwegii</i> cerrado	47
Galeana, 2008.	<i>P. hartwegii</i> abierto	21
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> denso	47
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	36
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> denso	42
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	27
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	31
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> abierto	14
Este estudio (método propuesto).	<i>P. hartwegii</i> abierto	14
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> denso	41
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	31
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> denso	36
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	24
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> semidenso	27
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> abierto	13
Este estudio (Anzures <i>et al.</i> , 2016).	<i>P. hartwegii</i> abierto	12

La razón por la que se obtiene un contenido bajo de carbono respecto a los otros estudios de caso puede deberse a diversos factores, tales como edad del

bosque, competencia, especies presentes, tipo de suelo, presencia de contaminantes, entre otros factores que en conjunto determinan la calidad del sitio (Ordóñez, 2018b), así como los almacenes de carbono considerados en la estimación. Las estimaciones altas del contenido de carbono en la biomasa sugieren que se trata de zonas altamente conservadas.

Al considerar los distintos almacenes de carbono en un ecosistema forestal, tales como el follaje, raíces, ramas, humus, productos maderables, entre otros, el contenido de carbono obtenido es más representativo. En suelos profundos de ecosistemas forestales se alberga aproximadamente dos terceras partes del carbono total (Ordóñez, 1999), en este bosque el espesor del suelo es somero, por lo que es válido suponer que el contenido de carbono sea menor.

6.3 Político ambiental

La estimación del contenido y captura potencial de carbono, que se adecue con el estado de conservación de la cobertura vegetal y uso de suelo, requiere del desarrollo de cartografía más precisa, que clasifique los tipos de vegetación lo más exacto posible, Jercy Rzedowski refiere que el conocimiento sobre las circunstancias de la cobertura vegetal a nivel nacional son deficientes (Rzedowski, 2006), por otra parte, se están promoviendo acciones que favorezcan la robustez de los inventarios forestales (Mallén *et al.*, 2018).

La política forestal en México tiene 5 escenarios a "futuro" según Caballero (2004):

- 1) Leyes decretadas sin efectuarse, debido a líneas de acción inconcretas, inexistente plataforma de aplicación y desconocimiento público;
- 2) Políticas aplicadas ineficientemente, debido a la corrupción y a la negligencia burocrática;
- 3) Restricciones de la política forestal por otras políticas sectoriales. Ineficiencia en la transversalidad para la toma coordinada de decisiones;
- 4) Vigencia efímera de las políticas y proyectos forestales, e;
- 5) Inexistencia de autoevaluación, por falta de interés en diseñar y aplicar criterios e indicadores de impacto.

Durante la COP 26 2021, México llamó la atención por su escasa participación contra la crisis climática, al alterar la línea base desde 2015, con la cual México reportaría sus Contribuciones Determinadas a Nivel y al mantener en 22% su meta de reducción de emisiones, el desempeño de México esta entendido como "altamente insuficiente". Al igual que Brasil, la alteración de la línea base representará un aumento de 0.3 Gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente

(Gt CO₂e) para 2030 (Energía Estratégica, 2021). Esta situación se suma a la eliminación del fideicomiso llamado Fondo para el Cambio Climático, el 22 de octubre del 2020, mediante la aprobación del Senado de la República, bajo el argumento de eliminar la corrupción en el manejo de estos recursos (CEMDA, 2020).

Es evidente que las dependencias carecen de fuerza para incidir en la gestión ambiental, ya que el interés del gobierno ha sido legitimar su posición ante la perspectiva mundial (Merino, 2019).

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Usando el software Google Earth Pro se pudo obtener rápida y satisfactoriamente el área total de El Parque Ecoturístico el Tepozán, resultando un total de 125 hectáreas y superficie con representación arbórea de 112.36 hectáreas.

La intensidad de muestreo del 6.2% permitió hacer estimaciones confiables sobre el contenido y captura potencial de carbono, así como para la captura potencial de CO₂e (Mg CO₂ e año⁻¹).

Se muestrearon un total de 1207 árboles, de los cuales, las clases diamétricas más representativas fueron de 21 a 30.9 cm y de 31 a 40.9 cm, sumando un total de 983 árboles representando un 77% respecto del total de árboles muestreados. La distribución de edades de la población es normal o gaussiana, demostrando que el bosque está creciendo adecuadamente.

El método propuesto en este estudio de caso es útil en la determinación de la captura potencial de CO₂e, ya que relaciona el valor del diámetro normalizado con la altura y el área basal, parámetros que reducen la incertidumbre en la estimación de la biomasa y el contenido de carbono.

Las ecuaciones alométricas usadas son confiables y sencillas de usar, permiten estimar a partir del diámetro normalizado de cada árbol la captura potencial de CO₂e, que extrapolándose a las 112.36 hectáreas de superficie arbórea se obtiene un valor de 253.12 Mg CO₂e año⁻¹, esta cifra está íntimamente relacionada con la calidad del sitio, el estado de conservación y del manejo forestal.

La mejor compensación económica mostrada en este trabajo (Neutralízate) ofrece 36.66 USD por Mg C año⁻¹, y 10 USD por Mg CO₂e año⁻¹, el bosque de *P. hartwegii* en el Parque Ecoturístico El Tepozán al haber capturado 55.69 Mg C año⁻¹, podría facturar al año 2,041.84 USD.

La estimación del potencial de captura de carbono para 5 años es de 1,265.60 Mg CO₂e y para 10 años de 2,531.20 Mg CO₂e año⁻¹, el incentivo económico impulsaría la conservación y uso sustentable del bosque, pudiendo aplicar también para incentivar la interacción humana con ecosistemas forestales más allá de los beneficios económicos y materiales que se puedan obtener.

Es necesario que se dupliquen los esfuerzos a distintos niveles de toma de decisiones, y que estos coincidan en líneas de acción concretas; en dirección a la conservación y recuperación de los bosques, teniendo especial consideración con el desarrollo rural sustentable y la identidad cultural.

La captura de carbono como estrategia de mitigación a los efectos del cambio climático es insuficiente, y debe sumarse al desarrollo, uso y movilización de tecnologías que propicien una transición energética sin efectos nocivos sobre el medio ambiente.

Es urgente que la comunidad científica sea capaz de identificar los distintos problemas socio ambientales que existen además de la forma de resolverlos, de tal manera que la investigación científica, a través de las universidades públicas y privadas, instituciones y organizaciones civiles, se involucren directamente con los problemas más urgentes de la población más vulnerable a los efectos del cambio climático.

El derecho y responsabilidad de intervenir en el manejo de los bosques, así como disponer de sus beneficios, debe recaer principalmente sobre los pueblos, comunidades y ejidos que sean dueños de los territorios que albergan estos ecosistemas.

REFERENCIAS

Acosta, M., Carrillo, F., Delgado, D. y Velasco, E. (2014). Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. ISSN 2007-1132 *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2014, 5 (Noviembre-Diciembre). [1/12/2019] URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439016002>. (p. 26).

Álvarez, C. (1989). La vegetación en la Sierra del Ajusco. Cuaderno de trabajo número 33. Departamento de Prehistoria. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. (p. 74), en: Vargas, F. (1997). Parques Nacionales de México. Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). México, D.F. (p. 11-18).

Anzures, F., A., Mireles, A., Cruz, M., González, C., Molina, L. y Etchevers, J. (2016). Allometric equations for estimating biomass and carbon from the aerial part of *Pinus hartwegii* in Ixta-Popo National Park, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 7. (p. 681 – 691).

Araujo, T., Higuchi, N. y Carvalho, J. (1999). Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rainforest site in the state of Paraná. Brazil. *Forest Ecology and Management* 117. (p. 43-52).

Avendaño, H., Acosta, M., Carrillo, A. y Etchevers, J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotec. Mex.* 32 (3). (p. 233-238).

Ayala, L., De Jong, B. y Ramírez, M. (2001). Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7 (2). (p 153-157).

Aznar, P., Climent, M., Domingo, R., Fernández, I., Flores, J., Galán, S., Gallo, L., Gobema, A., Marques, A., Meseguer, M., Pedro, J., Perles, M., Quílez, J., y Raga, J. (1992). *La Atmósfera. Conocer la Química del Medio Ambiente* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. (p. 28-32).

Balvanera, P. y Cotler, H. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. México: CONABIO. (p. 185-245).

Barry, R., y Chorley, R. (1999). *Atmósfera, tiempo y clima*. España: Ediciones Omega.

Basuki, T., van Laake, P., Skidmore, A. y Hussin, Y. (2009). Allometric equations for estimating the aboveground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology Management* 257 (8). (p. 1684–1694).

Bezaury, C. (2009). El Valor de los Bienes y Servicios que las Áreas Naturales Protegidas Proveen a los Mexicanos. México: The Nature Conservancy Programa México - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (p. 34). [19/08/2021]. URL: <https://www.cbd.int/financial/values/Mexico-valueprotectedareas.pdf>.

Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. en: Congreso Forestal Mundial. Antalya Turquía.

Burstein, J., Chapela, G., M., Aguilar, J. y de León E. (2002). Informe sobre la propuesta de Pago por Servicios Ambientales en México. Pago por Servicios Ambientales en las Américas. México: Fundaciones FORD Y PRISMA. (p. 102).

Caballero, M. (2004). “Análisis de la política forestal en México”. En: *Ciencia Forestal*. # 95. vol. 29, (p. 7-21).

Caballero, M. y Lozano, S. y Ortega, B., (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. [02/02/2020] URL: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>

Caemmer, S. y Quick, W. (2000). Rubisco: physiology in vivo. En: Leegood R., T.D. Sharkley y S. Von Caemmerer (Comp.) *Photosynthesis: physiology and metabolism*. Kluwer Academic Publisher. U.S.A. (p. 85-107).

Calvo, F. (2019). “Estimación del contenido y captura potencial de carbono en biomasa aérea y valoración económica en el área natural protegida Zicuarán – Infiernillo, Michoacán, México”. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. CDMX.

Carrillo A., Acosta, M., Jiménez, C., González., M., y Etchevers, B. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7 (3). [6/10/2020] URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n3/2007-0934-remexca-7-03-681-en.pdf>. (p. 681-691).

Casas, C. y Alarcón, M. (1999). *Meteorología y clima*. Barcelona: Ediciones UPC.

CEMDA, (2020). Desaparecen fideicomiso para atención del Cambio Climático, a pesar del amado de organizaciones ambientales. Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C. México, CDMX. [03/11/2021] URL: <https://www.cemda.org.mx/desaparecen-fideicomiso-para-atencion-del-cambio-climatico-a-pesar-del-llamado-de-organizaciones-ambientalistas/#:~:text=El%20Senado%20de%20la%20Rep%C3%ABlica,la%20a tenci%C3%B3n%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico.>

Ciencias Ambientales, (2019). Nueve años de tendencia a la baja en emisiones de GEI en Castilla-La Mancha. [24/06/2020]. URL: [https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/nueve-anos-tendencia-a-la-baja-inventario-emisiones-gei-castilla-la-mancha-17251.](https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/nueve-anos-tendencia-a-la-baja-inventario-emisiones-gei-castilla-la-mancha-17251)

Cochran, W. (1980). Técnicas de muestreo. CECOSA. México: Compañía Editorial Continental, S.A. ISBN: 9682601517 y 9789682601514. (p. 513).

Comisión para la cooperación ambiental, (CCA). (2001). México y el incipiente mercado de emisiones de carbón, oportunidades de inversión para pequeñas y medianas empresas en la agenda sobre el cambio climático mundial. Montreal (Quebec), Canadá.

CONABIO, (1998). Regiones terrestres prioritarias de México, Ajusco-Chichinautzin. [06/04/2020]. URL: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_108.pdf. (p. 398-508).

CONANP, (2015). Valoración de Servicios Ecosistémicos. Un enfoque para fortalecer el manejo de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (p. 131).

CONAFOR. (2010). Visión de México sobre REDD++. Hacia una Estrategia Nacional. Primera edición. SEMARNAT- CONAFOR. México. (p.56).

CONAFOR. (2011). Servicios Ambientales y Cambio Climático. SEMARNAT. México.

CONAFOR-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. (2011). Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. México.

CONANP, SEMARNAT, SIMEC. (2020). Ficha técnica para “Cumbres del Ajusco”. [29/03/2020]. URL: [https://simec.conanp.gob.mx/ficha_pdf.php?anp=58®=7.](https://simec.conanp.gob.mx/ficha_pdf.php?anp=58®=7)

CONAFOR. (2013) Servicios ambientales. Conafor.gob.mx. [30/03/2020].
URL: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/servicios-ambientales>

Conde, C. (2006). México y el cambio climático global. México D.F., Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. (p. 28).

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (1992). Naciones Unidas. (p. 3 y 4).

Cuadrat, J. y Pita, M. (1997). Climatología. España: Ediciones Cátedra, S.A. (p. 6).

Cuatecontzi, D. (2007). INECC; SEMARNAT. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. [24/06/2020].
URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html>.

Diaz, C. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. Naturaleza y desarrollo. Vol 12, Núm 1. 2014.

Diario Oficial de la Federación (DOF), (2018). Ley General de Cambio Climático. Última Reforma. DOF 13-07-2018. [25/01/2018] URL: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2019). ACUERDO en el que se establecen las bases preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones. SEMARNAT.

Dlugokencky, E., Houweling, S., Dirksen, R. Schroder, M., Hurst, D., Forster, P., Tarasova, O. y Braathen, G. (2016). Observación del vapor de agua. Organización Meteorológica Mundial. Vol 65 (2). [10/11/2021] URL: <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/observacio%CC%81n-del-vapor-de-agua>

Doney, S. y Schimel, D. (2015). Climate Change and Biogeochemical Impacts. Els, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. [26/08/2018] URL: [10.1002/9780470015902.a0003242.pub3](https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003242.pub3).

Dnofrio, S., Maguire, P., Myers, K., Daley, C. y Lin, K. (2021). Markets in Motion, State of the voluntary Carbon Markets 2021 Installment 1. Ecosystem Marketplace a Forest Trends Initiative. U.S.A., Washington, DC. (p. 5).

Douce, R. y Helot, H. (2000). Photorespiration. En: Photosynthesis; physiology and metabolism. Leegood R., T.D. Sharkley y S. Von Caemmerer (Comp.) Kluwer Academic Publisher. U.S.A. (p.115-131).

Earle, C. (2020). *Pinus hartwegii*. The gymnosperm database, *Pinus hartwegii*. [10/10/2020]. URL: https://www.conifers.org/pi/Pinus_hartwegii.php

Energía Estratégica, (2021). México altera índices y así todo mantiene sus propuestas de emisiones en COP 26. Energía estratégica. Centroamérica y el Caribe. [2/11/2021]. URL: <https://www.energiaestrategica.com/mexico-altera-indices-y-asi-todo-mantiene-sus-propuestas-de-emisiones-en-cop26/>.

Engracia, M. (2004). Sequía meteorológica, en Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT, INE. México. (p. 315).

Espinoza, M. (2005). Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del Rio Magdalena Contreras D.F. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México.

Ezcurra, E. (2019). Prólogo, en Merino, P. (Ed). 2019. Crisis Ambiental en México: rutas para el cambio. México, CDMX. Secretaria de Desarrollo Institucional, UNAM. (p. 13-18).

Farjon, A. y Styles, B. (1997). *Pinus* (Pinaceae). Flora Neotrópica Monograph 75. New York, NY: The New York Botanical Garden. En: Earle, C. (2020). *Pinus hartwegii*. The gymnosperm database, *Pinus hartwegii*. [10/10/2020]. URL: https://www.conifers.org/pi/Pinus_hartwegii.php.

Forest Trends. (2018). Ecosystem Marketplace. Voluntary carbon markets insights: 2018 outlook and first-quarter trends. [01/11/2018]. URL: <https://www.forest-trends.org/publications/voluntary-carbon-markets/>.

Fragoso, L. (2003). Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio “cerro grande” municipio Tanátaro Michoacán, México. Tesis de Ingeniero Agrónomo Especialista en bosques. Facultad de Agrobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Michoacán, México. (p. 77).

Franco, M. (2009). Estimación de la captura de carbono en zonas forestales. El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca. Ed. Instituto literario. Universidad Autónoma del Estado de México. México. (p. 136).

Francis, J. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science* 36(3-4). (p. 346-350).

Galeana, 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. Facultad de Filosofía y Letras, México, D.F. (p. 38).

Galeana, J., Ordóñez, J. y Corona, N. (2013). Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques*, vol. 19 (1):53-69.

García, E. (1989). Generalidades. En *Apuntes de Climatología UNAM*. México, D.F. (p. 1-3).

García, I. (2011). Estimación del contenido y captura potencial de carbono del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. Y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura, UNAM, México. (p.12).

Garduño, R. (2004). ¿Qué es el efecto invernadero? En *Cambio climático: una visión desde México*. México: Instituto Nacional de Ecología. (p. 29-39).

Gobierno de la República. (2016). Intended Nationally Determined Contribution Mexico. [14/09/2019] URL: <http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Mexico%20First/MEXICO%20INDC%2003.30.2015.pdf>

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. Y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ignea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Bolotin de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 7, núm. 3, 2005, (p. 227-283). [10/02/2022]. URL: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/349-sitio/articulos/cuarta-epoca/5703/1676-5703-2-gomez>.

Grijpma, I. (1984). *Producción Forestal*. Ed Secretaría de Educación Pública (SEP)/Trillas, 3a Reimpresión. México, D.F. (p. 134).

History of the IPCC. (2020). Suiza; Francia; Alemania; Reino Unido; Japón. IPCC. [29/03/2020]. url: <https://www.ipcc.ch/about/history/>.

Houghton, R. (2003). El Ciclo Contemporáneo del Carbono. Bioquímica (ed W.H Schlesinger) vol eight, Tratado de Geoquímica (eds. Holland, H. y Turekian, K.), Elsevier-Pergamon, Oxford. Inglaterra. (p. 473-513).

Houghton, S. (2009). Calentamiento Global. Una Revisión Completa. Reino Unido. Prensa Universitaria, Cambridge.

Hurst, D., Oltmans, S., Vomel, H., Rosenlof, K., Davis, S., Ray, E., Hall, E. y Jordan, A. (2011). Stratospheric water vapor trends over Boulder, Colorado: Analysis of the 30 year Boulder record. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116 (D2): D02306. [9/11/2021]. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JD015065>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Primer informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/Semarnat, México. (p. 11-13)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Reporte Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/SEMARNAT, México.

Igualdad Animal MÉXICO (2018). [23/06/2020]. URL: <https://igualdadanimal.mx/blog/el-cambio-climatico-implica-grandes-cambios-de-habitos-que-beneficiaran-todos/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1990) *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* [J. T. Houghton, G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (p. 212).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1992). *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. [13/11/2019]. URL: https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_Suppl_Report_1992_wg_lipcc_wg_l_1992_suppl_report_full_report.pdf. (p. 200).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1995). *Climate Change. The Science of Climate Change*. [14/11/2019]. URL: https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_l/ipcc_sar_wg_l_full_report.pdf (p. 531).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Informe de Síntesis. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). [13/11/2019]. URL: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>. (p. 27).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe, and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. 4 Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Informe del Grupo de Trabajo I – Base de las Ciencias Físicas. Modelo Idealizado del Efecto Invernadero Natural. [05/06/2021]. URL: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-3-figure-1.html.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013a). Climate Change 2013. The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013b): Glosario [Planton, S. (ed.)]. Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. (p. 151).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Comunicado de prensa del IPCC. [24/06/2020] URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/09/srocc_p51-pressrelease_es.pdf.

Jiménez, C. (2010). Uso de las ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.

Llorente, F. (2002). Composición y Distribución de la Atmósfera como un “océano de aire agitado”. RAM; revista del aficionado a la meteorología, No: 6. [24/06/2020]. URL: <https://www.tiempo.com/ram/numero6/pdf/meteorologia1.pdf>. (p. 4).

Lorimer, G. (1976). Evidence for the existence of discrete activator and substrate sites for CO₂ on Ribulose-1,5 biphosphate carboxylase. Journal of Biological Chemistry 254 (13). U.S.A. (p. 5599-5601).

Macias J. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: Volumen Conmemorativo de Centenario (Número 3). (p. 379-424).

Magaña, V. y Gay, C. (2002). Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. Gaceta Ecológica, 65, (p. 7 y 8). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [08/06/2021]. URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906501>

Malhi, Y. (2002). Carbono en la atmósfera y biosfera terrestre en el siglo XXI. Editorial de la Real Sociedad. Transacciones Filosóficas: Ingeniería Matemática, Física, 360 (1801). (p. 2925-2945).

Mallén, C., Figueroa, C., Mendoza, B. y Ordóñez, J. (Ed). (2018). La Comisión Nacional Forestal y el Desarrollo Sustentable de México, 2012-2018. Servicios Ambientales y Cambio Climático SACC A.C. México. CDMX. (p. 6-10, 42-48, 78-80, 126-128).

Margarita, D. (2017). Evaluación de estrategias de gestión de sostenibilidad ambiental de los gases de efecto invernadero en las empresas de servicio de telefonía en Sudamérica para la identificación de errores y mejores prácticas. [24/06/2020]. URL: https://www.researchgate.net/publication/320537886_EVALUACION_DE ESTRATEGIAS_DE GESTION_DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL_D E LOS GASES_DE EFECTO_INVERNADERO_EN LAS_EMPRESAS_DE_SER

VICIO_DE_TELEFONIA_EN_SUDAMERICA_PARA_LA_IDENTIFICACION_DE_ERRORES_Y_MEJORES_P.

Masera, O. (1995). Future Greenhouse Emission and Sequestration Scenarios from Land Use Change in Mexico. Report to UNEP from the Project Mexico's Country Study on Greenhouse Gas Emissions, Instituto Nacional de Ecología, Mexico City.

Masera, O. (1996). Deforestación y degradación forestal en México. Documento de Trabajo 19. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro, Michoacán, México. (p. 50).

Masera, O., Cerón, A. y Ordóñez, J. (2001). Forestry mitigation option for México: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change. (p. 291-312).

Merino, P. (Ed). (2019). Crisis Ambiental en México: rutas para el cambio. México, CDMX. Secretaria de Desarrollo Institucional, UNAM. (p. 13-27)

México ante el cambio climático, (2021). Acuerdos internacionales. [16/02/2022]. URL: <https://cambioclimatico.gob.mx/acuerdos-internacionales/>.

Mohanakumar, K. (2008). Stratosphere-troposphere interactions: an introduction. Springer science. E.U.A. (p. 1-53).

Molina, M., Sarukhán, J. y Carabias, J. (2017). El cambio climático. Causas, efectos y soluciones. México: Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública, Conacyt. Colección La Ciencia para Todos.

Mora, G., Caballero, C., Urrutia, J. y Uchiumi, Sh. (1992). Southward migration of volcanic activity in the Sierra Las Cruces, basin of México, -a preliminary study: Geofísica Internacional, V. 30 (2). (p. 61-70).

Moreno, H. (2020). La emisión de gases de efecto invernadero en tiempos de COVID-19. Universitarios Potosinos. Facultad de Ciencias, UASLP.

Mostacedo, B. y Fredericksen, T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en Ecología Vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOS) Santa Cruz, Bolivia. (p. 87).

Muñoz, R., Valdez, J., de los Santos, H., Ángeles, G. y Monteerroso, H. (2014). Inventario y mapeo del bosque templado de hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. Agrobiencia 48: (pp.847-862). [17/06/2021].

URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000800007.

Naciones Unidas, (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. [20/10/2019]. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>. (p. 3-5).

Naciones Unidas, (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. [08/06/2021]. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>. (p: 2-22).

Naciones Unidas, (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. [23/06/2020]. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible>.

NASA Official, (2019). 2018 Was the Fourth Warmest Teay, Continuing Long Warming Trend. earth observatory [24/07/2020]. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/144510/2018-was-the-fourth-warmest-year-continuing-long-warming-trend>.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (2021a). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. [2/06/2021]. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (2021b). Trends in CO₂, Trends in CH₄, Trends in N₂O, Trends in SF₆. [10/11/2021]. URL: gml.noaa.gov/ccgg/trends/.

National Weather Service (NWS), (2020). Layers of the Atmosphere [23/06/2020]. URL: <https://www.weather.gov/jetstream/layers>.

Navia, J. y Velarde, J. (2002). Prefactibilidad de captura de carbono para el conjunto predial La Majada-Cerro Grande Uruapan Michoacán, México.

Observatorio Boliviano de Cambio Climático y Desarrollo (OBCCD), (2022). Gases de efecto invernadero, Información, análisis y debate sobre cambio climático y “desarrollo”. Blog de WordPress.com. Bolivia. [28/02/2022]. URL: [https://obccd.org/gases-de-efecto-invernadero-co2e-co2-y-carbono/#:~:text=El%20CO2%20%C2%ABequivalente%C2%BB%20\(CO2e,al%20gas%20di%C3%B3xido%20de%20carbono](https://obccd.org/gases-de-efecto-invernadero-co2e-co2-y-carbono/#:~:text=El%20CO2%20%C2%ABequivalente%C2%BB%20(CO2e,al%20gas%20di%C3%B3xido%20de%20carbono).

Oralia, O., Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación, en Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT, INE. México. (p. 303).

Ordóñez, J. (1998). Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F

Ordóñez, J. (1999). Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán. 1ª edición. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP (Semarnat). México. D.F. (p. 7- 68).

Ordóñez, J. y Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. Madera y Bosques, 7 (1). México. (p. 3-12).

Ordóñez, J. y Medrano, H. (2003). Estimación preliminar del contenido de carbono en los bosques de San Pedro Jacuaro, Michoacán. Bosques y Selvas de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Abril-junio, Año 1, Vol. 1 (2). (p. 20- 23).

Ordóñez, J. (2008a). Emisiones y captura de carbono derivadas de La dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la región purépecha. Capítulo I. Los ecosistemas forestales y el cambio climático en México. Tesis doctoral en Ciencias Biomédicas. Instituto de Ecología. UNAM. (p. 140).

Ordóñez, J. (2008b). Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales. Ciencias. Número 90: 37-42 (abril-junio). Facultad de Ciencias, UNAM. (p. 2-8). [13/08/2021]. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/644/64411395006.pdf>.

Ordóñez, J., de Jong, B., García, F., Aviña, F., Pérez, J., Guerrero, G., Martínez, R. y Masera, O. (2008c). Carbon content in vegetation, litter, and soil under ten different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico, Forest Ecology and Management. Volume 255:2074-2084, issue 7, 20 April. ISSN 0378-1127

Ordóñez, J., Jiménez, I., Caballero, M., Carmona, J., Galicia, A., Calvo, F., Balam, M., Rojas, R. y Jiménez, J. (2015a). Capítulo 5: Restauración de servicios ambientales, en el Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. En: Los pagos por servicios ambientales: intercambio de experiencias de la Red Iberoamericana de PSA. (Edit.) Ángeles Alberto Villavicencio. Colección Debates, El Colegio de

Michoacán. Zamora, Michoacán. (ISBN 978-607-9470-15-9). México. (p. 103-118).

Ordoñez J., Galicia, A., Venegas, N., Hernández, T., Ordóñez, M. y Davalos, R. (2015b). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*. Vol 21, número 77-126 [10/06/2021] URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000400006

Ordóñez, J., Rivera, V., Tapia, M., y Ahedo, H. (2016). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol.6 (32). (p. 7-16).

Orr, J., Fabry, V., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S., Feely, R., Gnaedesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joss, F., Key, R., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R., Plattner, G., Rodgers, K., Sabine, C., Sarmiento, J., Schlitzer, R., Slater, R., Totterdell, I., Weirig, M., Yamanaka, Y. y Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twnty-firt century and its impact on calcifying organisms. *Nature*. 437, [09/06/2021] URL: <https://www.nature.com/articles/nature04095>. (p: 681-686).

Procuraduria Ambiental y Del Ordenamiento Territorial Del D.F. (PAOT) (1936). Decreto que declara Parque Nacional Cumbres del Ajusco, la porción de esa serranía que el mismo delimita. *Diario Oficial de la Federación*. [18/02/2022]. URL: http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/informes/informe2003_borrarme/2002/informe/esta/ajusco.PDF.

Pagiola, S., Bishop, J. y Landell-Mills, N. (2003). La venta de servicios ambientales forestales, mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT) Periférico sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, C.P. 04530. México, D.F. (p. 464).

Parque El Tepozán, (2020). Ciudad de México: Facebook. [02/04/2020] URL: <https://www.facebook.com/PARQUETEPOZAN/>.

Pascal, A. (2005). *Histoire du climat (Historia del clima)*. Argentina: El Pirata Triste. (p. 42-47).

PINCC-UNAM. (2016). *Visiones de la Cop21 El Acuerdo De París: retos y áreas de oportunidad para su implementación en México*. Universidad Nacional

Autónoma de México Programa de Investigación en Cambio Climático. México, 2016.

Plass, G. (1956). La teoría del dióxido de carbono del cambio climático. *Tellus* 8(2). (p. 140-154).

Portis, A. (1995). The regulation of Rubisco by Rubisco activase. *Journal of experimental botany*. 46. Oxford. England. (p. 1285-1291).

Pronatura, (2019). Informe anual 2019. Pronatura México A.C. México, CDMX. [3/11/2021] URL: <http://pronatura.org.mx/quienes-somos.php#informes>. (p. 30).

Raghavendra, A. (1998). *Photosynthesis: A comprehensive Treatise*. Cambridge University Press. England. (p. 394)

Reid, J. (2015). Cap. El debate actual sobre la utilidad de la valoración de los servicios ecosistémicos en las políticas públicas. En: CONANP, 2015, *Valoración de servicios ecosistémicos: Un enfoque para fortalecer el manejo de las Áreas Naturales Protegidas* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. (p. 43-56).

Riebeek, H. (2011). El Ciclo del Carbono. NASA Official, observatorio de la tierra. [10/11/2021] URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>.

Ritchie, H y Roser, M. (2019). Annual total CO emissions, by world region. *Our World in Data*. [26/05/21]. URL: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

Robinson, S., Klekociuk, A., King, D., Pizarro Rojas, M., Zúñiga, G. y Bergstrom, D. (2020). The 2019/2020 summer of Antarctic heatwaves, *Global Change Biology*. 26. (p. 3178-3180).

Romero, E. (1998). *Geología del Volcán Ajusco*, (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F.

Rojas, M. (2018). "Estimación de carbono almacenado en la biomasa aérea en el bosque de El Carricito, Jalisco, México". Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. CDMX, México. (p. 59).

Rudiño, L. (2011). "Parque el Tepozán. Turismo ecológico, educativo y cultural", *La Jornada del Campo*, Número 50. CDMX, México. [16/02/2022]. URL: <https://www.jornada.com.mx/2011/11/19/cam-chinampas.html>.

Rügnitz, T., y Porro, R. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Manual técnico 11, Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú.

Red Universitaria de Observatorios Astronómicos, (RUOA). (2020). Atlas Climático Digital de México, Redes de observación atmosférica y ambiental. [07/04/2020] URL: <http://atlasclimatico.unam.mx/RUOA/servmapas>.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [07/09/2020]. URL: http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf. (p. 382).

Sabine, C. (2006). Ciclo Global del Carbono. En Els, John Wiley e hijos, Ltd. (Ed.). [10/09/2021] URL: doi: 10.1038/npg.els.0003489.

Sampson, R., Apps, M., Brown, S., Cole, C., Downing, J., Heath, L., Ojima, O., Smith, T., Solomón, A. y Wisniewski, J. (1993). Declaración resumida del taller: Flujos de carbono biosférico terrestre: cuantificación de sumideros y fuentes de CO₂, contaminación del agua, el aire y el suelo, 70. (p. 3-15).

Sathaye, J., Makundi, W., Andrasko, K., Boer, R., Ravindranath, N., Sudha, P., Sao, S., Lasco, R., Pulhin, F., Maser, O., Ceron, A., Ordóñez, J., Deying, X., Zhang, X. y Zoumin, S. (2001). Potencial de mitigación de carbono y costos de la opción forestal en Brasil, China, India, Indonesia, México, Filipinas y Tanzania. En: Estrategias de mitigación y adaptación al Cambio Global. (p. 185-211).

Schimel, U. (1995) Ecosistemas terrestres y El Ciclo del Carbon. Biología del Cambio Climático. (p: 77-91).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT). (2015). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto, (CMNUCC). México. Gobierno de México. [30/03/2020]. URL: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-y-su-protocolo-de-kioto-cmnucc>.

Secretaría del Medio Ambiente, (SMA). (2016). Avanza Reforestación en la CDMX. Boletín 106/2016. [13/02/2022]. URL: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/avanza-reforestacion-en-la-cdmx>.

Smith, T., Cramer, W., Dixon, R., Leemans, R., Neilson, R. y Solomon, A. (1993). El Ciclo Terrestre del Carbon. En Wisniewski, J y R.N. Sampson (Eds).

Flujos de Carbono en la Biosfera Terrestre. Orígenes y Cuantificación de CO₂ Kluwer Academic Publishers, Netherlands. (p. 19-37).

Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF). (2005). Diccionario Forestal. España: Mundi-Prensa. (p. 1317).

Strieby, M. (2020). Illustration of tree, cones, and foliage. Conifers.org, The gymnosperm database, *Pinus hartwegii*. [10/10/2020]. URL: https://www.conifers.org/pi/Pinus_hartwegii.php

Tafari, R., Chiesa, G., Caminati, R. y Gaspio, N. (2015). Desarrollo, Medio Ambiente y Salud. Revista de Salud Pública. (XIX) 1:22-37. (p. 23).

Ter, M. y Korzukhin, M. (1997). Biomass equation for sixty five North American tree species. Forest Ecol. Manag. 97 (1). (p. 1-24).

The Forest Foundation (TFF). (2008). Los bosques y el ciclo del carbono. Compartiendo conocimientos sobre el bosque. E.U.A. (p. 46).

Torres, R. y Guevara, S. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Gaceta Ecológica. SEMARNAT. México. (p. 40-63).

Torres, J., Flores, G., Calvo, F., Balam, L., Sepúlveda, V., García, O., y Araujo, Z. (2010). Valoración económica de seis Áreas Naturales Protegidas como sumideros de CO₂: Laguna Madre, Marismas Nacionales, Zicuirán-Infiernillo, Sierra de Abra Tanchipa, Xilitla y Sierra Madre Oriental. México: GTZ-CONANP. (p. 137).

UNFCCC. (2016). Conference of the Parties Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session. FCCC/CP/2015/10/Add.1. [04/06/2019] URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>

Valenzuela, H. (2001). Estimación de secuestro de Carbono en Bosques Naturales de Oyamel en el sur del Distrito Federal. Tesis Profesional, Chapingo, Edo. De México. (p. 59-60).

Vargas, F. (1997). Parques Nacionales de México. Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). México, D.F. (p. 11-18).

Velasco, E., Moreno, F., y Rodríguez, R. (2002). Comparación de siete diseños de unidades de muestreo secundarias en inventarios forestales. *Revista Ciencia Forestal en México*. 27(92). (p. 29-45).

Velasco, B., Ramírez, M., Moreno, S. y de la Rosa, V. (2005). Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Rev. Ciencia For. México*. 28: (p. 23-43).

Velázquez, A., Toledo, V. y Luna, I. (2000). Vegetación templada mexicana. MG Barbour y WD Billings (eds.), *Vegetación terrestre de América del Norte*. Nueva York: Cambridge University Press. (p. 573-592).

Wallace, J. y Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science: An introductory Survey*. 2a ed. Elsevier E.U.A. (p. 483).

Zamora, C. (2003). Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido "La Majada" Municipio de Peribán de Ramos, Michoacán. Tesis de Ingeniería en Agronomía con la Especialidad en Bosques. Facultad de Agrobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México. (p. 59).

Zaragoza, E. (2017). MiMorelia.com, [23/06/2020]. URL: <https://www.mimorelia.com/desmantelan-90-hectareas-de-huertas-ilegales-de-aguacate-en-michoacan/>