



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

División de Ciencias Forestales

Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales

**“ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO Y CAPTURA DE
CARBONO EN BOSQUES DE LA RESERVA
ECOLÓGICA COMUNITARIA DE SAN MIGUEL
TOPILEJO, CDMX”.**

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales

Presenta:

FRANCISCO CISNEROS RODRÍGUEZ

Bajo la supervisión de: José Luis Romo Lozano, Dr.



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**



Chapingo, Estado de México, mayo de 2025

“ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO Y CAPTURA DE CARBONO EN BOSQUES
DE LA RESERVA ECOLÓGICA COMUNITARIA DE SAN MIGUEL TOPILEJO,
CDMX”.

Tesis realizada por **Francisco Cisneros Rodríguez** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

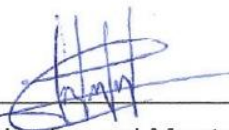
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



Dr. Jose Luis Romo Lozano

ASESOR:



Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

ASESOR:



Dr. Alejandro Corona Ambriz

Contenido

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Particulares	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Contenido temático del Documento de Titulación	6
1.6. Literatura Citada.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
2.1. Estudios más relevantes sobre captura de carbono como estrategia para combatir los efectos del Cambio Climático	12
2.1.1. Contexto global de la captura de carbono.....	12
2.1.2. Captura de carbono en América Latina.....	13
2.1.3. Contexto nacional: Captura de carbono en México.....	14
2.2. Proyectos y programas en materia de estimación de captura de carbono	16
2.2.1. Contexto global de los proyectos de estimación de captura de carbono	16
2.2.2. Proyectos de captura de carbono en América Latina.....	17
2.2.3. Proyectos de captura de carbono en México	19
2.3. Metodologías para estimación y captura de carbono	21
2.4. Literatura citada	24
3. METODOLOGÍA	31
3.1. Área de estudio	31
3.2. Enfoque metodológico general.....	33

3.3. Metodología para el Objetivo particular 1: Identificación de las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de san Miguel Topilejo	34
3.3.1. Caracterización ecológica del bosque.....	34
3.4. Metodología para los Objetivos particulares 2 y 3: Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono aéreo en 100 hectáreas de bosque dentro de la reserva y calcular el potencial de captura de carbono aéreo en el área de estudio, con base en modelos de proyección.	37
3.4.1. Diseño metodológico para la estimación y proyección de carbono.	37
3.5. Literatura citada	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1. Introducción.....	47
4.2. Resultados del Objetivo 1: Identificación de las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México	48
4.2.1. Estrato arbóreo	49
4.2.2. Estrato arbustivo	49
4.2.3. Estrato herbáceo.....	49
4.2.4. Riqueza de especies.....	50
4.2.5. Análisis del componente arbóreo	50
4.2.6. Discusión del Objetivo 1.....	57
4.3. Resultados de los objetivos 2 y 3: Estimación del contenido y captura potencial de carbono aéreo en el bosque de la Reserva ecológica comunitaria de San Miguel Topilejo	59
4.3.1. Caracterización del componente arbóreo del bosque	59
4.3.2. Composición florística y diversidad del arbolado	60
4.3.3. Estructura y dominancia del arbolado	61
4.3.4. Estimación de la biomasa aérea total del arbolado (BAT).....	62
4.3.5. Determinación del carbono y CO ₂ equivalente	63
4.4. Proyección del potencial de captura de carbono.....	66

4.4.1.	Acumulación proyectada de CO ₂ equivalente al año 2050 bajo escenarios climáticos contrastantes	71
4.4.2.	Discusión de Resultados.....	77
4.4.3.	Conclusiones	79
4.5.	Literatura citada	81
5.	GUÍA TÉCNICA PARA EJIDOS Y COMUNIDADES: PROYECTOS DE CARBONO FORESTAL BASADOS EN EL PROTOCOLO FORESTAL PARA MÉXICO V3.0	87
5.1.1.	Introducción	87
5.1.2.	Metodología de elaboración de la guía	88
5.1.3.	Contenido estructural de la Guía Técnica	89
5.1.4.	Discusión sobre la utilidad y pertinencia de la guía.....	91
5.1.5.	Conclusiones	91
5.2.	Literatura citada	93
6.	CONCLUSIONES GENERALES	94
6.1.	Cumplimiento de los objetivos particulares	94
7.	APÉNDICE A	97
7.1.	Guía Técnica para Ejidos y Comunidades: Proyectos de Carbono Forestal Basados en el Protocolo Forestal para México v3.0	97

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Fórmulas aplicadas en el análisis de distribución y diversidad de especies.....	36
Cuadro 2. Coeficientes específicos por especie.	39
Cuadro 3. Densidades básicas de madera de las especies analizadas.	40
Cuadro 4. Índice de valor de Importancia (IVI) en comunidades arbóreas de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo	52
Cuadro 5. Estadísticos descriptivos de biomasa aérea por árbol (kg)	63
Cuadro 6. Estadísticos descriptivos del carbono y CO ₂ e por árbol.....	64
Cuadro 7. Carbono y CO ₂ e total por especie.....	65
Cuadro 8. Parámetros del modelo sigmoideal ajustado por especie para proyecciones de crecimiento (altura en función del DAP).....	67
Cuadro 9. Comparación de captura proyectada de CO ₂ e al año 2050 entre escenarios climático óptimo y seco.....	74
Cuadro 10. Distribución de la captura de CO ₂ e por especie en el escenario base.	75
Cuadro 11. Distribución de la captura de CO ₂ e por especie en el escenario seco.	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la comunidad de San Miguel Topilejo en la Ciudad de México y delimitación de la Reserva Ecológica Comunitaria	31
Figura 2. Distribución de las especies por estrato en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo.....	50
Figura 3. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 1 al 5	54
Figura 4. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 6, 7, 9 y 10	54
Figura 5. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 11, 12, 13, 14, 15 y 20.....	55
Figura 6. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 16, 21, 22, 26 y 40	55
Figura 7. Comparación estructural global por grupo de unidades de muestreo	55
Figura 8. Distribución taxonómica de especies registradas en bosque de pino en la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.	56
Figura 9. Distribución taxonómica de especies registradas en bosque mixto de pino-encino de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.	56
Figura 10. Distribución taxonómica de especies registradas matorral de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.....	57
Figura 11. Distribución taxonómica de especies registradas en pastizal de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.....	57
Figura 12. Distribución espacial de las comunidades vegetales identificadas en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo.	57
Figura 13. Comparación del CO ₂ e por especie en el área de estudio.....	65
Figura 14. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Pinus montezumae</i> (Lamb.)	68

Figura 15. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Pinus hartwegii</i> (Lindl.)	68
Figura 16. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. & Cham., mostrando una relación más estable a medida que el árbol crece.....	69
Figura 17. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Alnus acuminata</i> (Kunth).	69
Figura 18. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Alnus jorullensis</i> (H.B.K.)	70
Figura 19. Ajuste del modelo sigmoidal para <i>Alnus firmifolia</i> (Fernald).....	70
Figura 20. Proyección de captura de CO ₂ equivalente por especie (2025–2050) bajo escenario base (continuidad climática).	72
Figura 21. Proyección de captura de CO ₂ equivalente por especie (2025–2050) bajo escenario seco (estrés hídrico).	73

ABREVIATURAS

APA: American Psychological Association

CAR: Climate Action Reserve

CDMX: Ciudad de México

CO₂e: Dióxido de carbono equivalente

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

CONAPO: Consejo Nacional de Población

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GHG: Greenhouse Gases (Gases de Efecto Invernadero)

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

DEDICATORIA

Con profundo agradecimiento a mis queridos padres, cuya sabiduría, amor incondicional y valores continúan guiando cada paso de mi vida. Su ejemplo de esfuerzo y dedicación permanece vivo en mí, y este logro es, en esencia, tanto suyo como mío.

A mis hermanos, por su apoyo constante, por su cariño y por ser una fuente de fortaleza a lo largo de este viaje académico y personal. Siempre han estado ahí para impulsarme a seguir adelante, acompañándome con generosidad y cercanía en cada etapa del camino.

Y, de manera muy especial, a mi amada esposa María Elena, cuyo amor, paciencia y apoyo han sido mi mayor motivación. Gracias por tu comprensión, por estar a mi lado en todo momento. Esta tesis es, en gran parte, fruto de tu amor y del impulso que me diste para no rendirme.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar este posgrado y por ser la base de mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por su apoyo financiero a través de la beca otorgada, que me permitió continuar con mis estudios y el desarrollo de esta investigación.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP), por su respaldo en la realización de este proyecto de investigación.

A mis directores de tesis, el Dr. José Luis Romo Lozano, por su invaluable paciencia, conocimientos y por compartir su tiempo durante mi formación en el posgrado, así como en el desarrollo de esta investigación; al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas, por su dedicación, apoyo constante y la confianza depositada en mí a lo largo de todo el proceso; y al Dr. Alejandro Corona Ambriz, por sus aportes fundamentales y la orientación brindada para el avance de este trabajo.

A la Comunidad de San Miguel Topilejo, por su hospitalidad, facilidades y la confianza brindada, permitiéndome llevar a cabo este estudio en su territorio.

DATOS BIOGRÁFICOS



Nombre: Francisco Cisneros Rodríguez

Lugar y fecha de nacimiento: Ciudad de México, 23 de abril de 1981

Carrera de licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Institución de egreso: Universidad Autónoma Chapingo

Cedula profesional: 5406570

Francisco Cisneros Rodríguez vivió su infancia y juventud en el municipio de Texcoco, Estado de México. Estudió el bachillerato en la Preparatoria Anexa a la Normal de Texcoco (1997–2000) y la licenciatura en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables en la Universidad Autónoma Chapingo (2002–2007), titulándose en septiembre de 2007 con la tesis “Propuesta de Plan de Manejo de los Recursos Naturales de la Comunidad de San Pedro Atlapulco, Municipio de Ocoyoacac, Estado de México.”

De 2007 a 2022 trabajó en los sectores público, privado e internacional en temas como conservación ambiental, desarrollo agrario, ordenamiento territorial y sostenibilidad. En el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) coordinó proyectos como “Alternativas para el Desarrollo de Núcleos Agrarios” y la “Actualización del Atlas de la Propiedad Social en México,” supervisando equipos técnicos y operativos. También colaboró con la Comisión de Recursos Naturales y el Registro Agrario Nacional en programas de desarrollo rural y urbano, y como consultor independiente participó en proyectos de energía sustentable, infraestructura municipal y acción climática. Desde 2023 cursa la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

Estimación del contenido y captura de carbono en bosques de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, CDMX¹

El presente trabajo tuvo como objetivo estimar el contenido y la captura de carbono en los bosques templados de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, ubicada en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Se plantearon cuatro objetivos: (1) identificar las condiciones físicas y biológicas del bosque; (2) estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en un polígono de 100 hectáreas; (3) proyectar la captura potencial de carbono en un horizonte de 25 años, y (4) elaborar una Guía Técnica orientada a comunidades interesadas en mercados de carbono.

Se utilizó una estrategia metodológica mixta. Para el primer objetivo, se evaluaron 25 unidades de muestreo de 1,000 m². Se registraron 87 especies vasculares, destacando las familias Asteraceae, Poaceae y Pinaceae. Para los objetivos 2 y 3, se establecieron 65 parcelas circulares permanentes dentro de un polígono de 100 hectáreas, aplicando ecuaciones alométricas específicas por especie. Estas parcelas representaron un muestreo efectivo de 2.6 hectáreas (intensidad del 2.6 %). La biomasa aérea promedio fue de 696.89 kg por árbol (580 individuos), lo que permitió estimar un almacenamiento total de 404.2 toneladas de biomasa, equivalentes a 202.1 toneladas de carbono y 741.7 toneladas de CO₂e.

La proyección del potencial de captura se realizó mediante modelo sigmoideal de crecimiento ajustados en R, estimando una acumulación de hasta 403 toneladas de CO₂e por hectárea en un periodo de 25 años bajo un escenario climático continuo. En contraste, bajo un escenario seco con estrés hídrico, se previó una reducción del 30 % en la tasa de captura proyectada.

Como resultado del cuarto objetivo, se elaboró una Guía Técnica basada en el Protocolo Forestal para México v3.0, estructurada para facilitar su implementación en contextos comunitarios.

Palabras clave: carbono forestal, biomasa aérea, captura de carbono, reservas comunitarias, monitoreo forestal

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Francisco Cisneros Rodríguez

Director de Tesis: José Luis Romo Lozano

GENERAL ABSTRACT

Estimation of carbon content and capture in forests of the San Miguel Topilejo
Community Ecological Reserve, CDMX²

This study aimed to estimate the carbon content and capture in the temperate forests of the San Miguel Topilejo Community Ecological Reserve, located within the Conservation Land of Mexico City. Four objectives were established: (1) to identify the forest's physical and biological conditions; (2) to estimate aboveground biomass and carbon content within a 100-hectare polygon; (3) to project potential carbon capture over a 25-year period; and (4) to develop a Technical Guide for communities interested in participating in carbon markets.

A mixed methodological strategy was employed. For the first objective, 25 sampling units of 1,000 m² were assessed, recording 87 vascular plant species, with dominance of the Asteraceae, Poaceae, and Pinaceae families. For objectives 2 and 3, 65 permanent circular plots were established within the 100-hectare polygon, applying species-specific allometric equations. The plots covered an effective sampling area of 2.6 hectares, corresponding to a 2.6% sampling intensity. The average aboveground biomass was 696.89 kg per tree (580 individuals), resulting in a total biomass estimate of 404.2 tons, equivalent to 202.1 tons of carbon and 741.7 tons of CO₂e.

Carbon capture potential was projected using sigmoid growth models fitted in R, estimating an accumulation of up to 403 tons of CO₂e per hectare over 25 years under a continuous climate scenario. In contrast, under a dry scenario with water stress, a 30% reduction in the projected carbon capture rate was anticipated.

As a result of the fourth objective, a Technical Guide was developed based on the Forest Protocol for Mexico v3.0, structured to facilitate its implementation in community contexts..

Keywords: forest carbon, aboveground biomass, carbon capture, community reserves, forest monitoring

² Thesis: Master of Science in Forest Sciences , Universidad Autónoma Chapingo

Author: Francisco Cisneros Rodríguez

Advisor: José Luis Romo Lozano

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Antecedentes

El cambio climático constituye uno de los problemas más apremiantes de la actualidad. No se trata únicamente de un incremento en las temperaturas globales, sino de un fenómeno complejo que compromete la estabilidad de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el bienestar humano a escala global. Desde la Revolución Industrial, las actividades humanas intensificaron significativamente la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo que ocasionó un aumento estimado de 1.1 °C en la temperatura promedio global durante el periodo 2011–2020, en comparación con los niveles preindustriales (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Este calentamiento amplificó la frecuencia y magnitud de fenómenos climáticos extremos, como olas de calor, sequías, precipitaciones intensas e incendios forestales.

Entre los GEI, el dióxido de carbono (CO₂) se identificó como el principal responsable del calentamiento global, al representar aproximadamente el 76 % de las emisiones antropogénicas totales (IPCC, 2023). Las principales fuentes de emisión de CO₂ incluyeron la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, el transporte, los procesos industriales y la deforestación. A pesar de los avances tecnológicos y los compromisos internacionales —como el Protocolo de Kioto (1997) y el Acuerdo de París (2015)—, la reducción de emisiones continuó representando un desafío considerable. El Protocolo de Kioto comprometió a los países firmantes a reducir sus emisiones en un 5 % respecto a los niveles de 1990, mientras que el Acuerdo de París estableció como objetivo limitar el incremento de la temperatura global a menos de 2 °C, con la meta ideal de no superar los 1.5 °C. Según el último informe del IPCC (2023), alcanzar dicho objetivo requería reducciones drásticas e inmediatas en las emisiones globales de carbono.

En este contexto, las actividades de conservación y restauración de ecosistemas forestales se reconocen como estrategias eficaces para mitigar el cambio climático (IPCC, 2023). Los bosques, que hasta el año 2020 cubrían aproximadamente el 31 % de la superficie terrestre —equivalente a 4,060 millones de hectáreas—, almacenaban cerca de 662 gigatoneladas de carbono en su biomasa, madera muerta, hojarasca y suelos. Esta cantidad representaba más de la mitad de las reservas mundiales de carbono terrestre (FAO, 2020). No obstante, la deforestación continuó siendo una amenaza latente: entre 2015 y 2020, se perdieron alrededor de 10 millones de hectáreas de cobertura forestal cada año, principalmente debido a la expansión agrícola y urbana (FAO, 2020).

Frente a este panorama, los mercados de carbono emergieron como una herramienta clave para incentivar la conservación de los bosques y fomentar la reducción de emisiones. A través de estos mecanismos, gobiernos y empresas adquirieron créditos de carbono generados por proyectos de conservación, reforestación o implementación de tecnologías limpias, con el fin de compensar sus propias emisiones (Verra, 2022). En países como México, donde cerca del 70 % de los bosques pertenece a ejidos o comunidades, el aprovechamiento sustentable de estos ecosistemas mediante esquemas de financiamiento climático ofreció una oportunidad para mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales y contribuir a la mitigación del cambio climático (CONAFOR, 2020).

En este escenario, la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, localizada en la Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, adquirió un carácter estratégico. Esta área, que forma parte del Suelo de Conservación de la capital, comprendió aproximadamente 6,000 hectáreas (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2007). En su interior se identificaron diversos ecosistemas, entre ellos bosques de pino (*Pinus hartwegii* Lindl.), bosques mixtos de pino-encino (*Pinus-Quercus*), bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), pastizales de alta montaña y vegetación secundaria. Esta diversidad ecológica

resultó esencial para la conservación de la biodiversidad local, la captura de carbono y la regulación climática (Carpinteyro-Urbán, 2014).

Además, sus características geológicas y edáficas le confieren una función hidrológica crítica. Los suelos predominantes —litosoles y andosoles— presentan una capacidad de infiltración de media a alta, favoreciendo la recarga de acuíferos. La geología de la zona estuvo dominada por formaciones de basaltos y tobas volcánicas fracturadas, las cuales generaron suelos altamente permeables, fundamentales para el abastecimiento hídrico de la ciudad (Carpinteyro-Urbán, 2014).

Mediante la aplicación del Protocolo Forestal para México v3.0, esta investigación tuvo como propósito estimar el contenido y la captura potencial de carbono en los bosques de dicha reserva, generando información técnica que permitiera su inclusión en esquemas de compensación de emisiones y financiamiento climático. El objetivo final consistió en aportar datos sólidos, respaldados por una metodología robusta, sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de estos ecosistemas, promoviendo su valorización económica y su conservación. Con ello, se buscó demostrar que la preservación de los ecosistemas forestales no solo respondía a una necesidad ambiental urgente, sino que también representaba una alternativa viable para generar beneficios sociales y económicos en las comunidades locales.

1.2. Justificación

La Ciudad de México, más allá de su extensa urbanización, conserva aproximadamente el 59 % de su territorio como Suelo de Conservación (SC), el cual incluye ecosistemas como bosques templados, pastizales de alta montaña, humedales y zonas agropecuarias (SEDEMA, 2016). Estas áreas se concentran principalmente en las alcaldías del sur de la ciudad, donde desempeñan un papel clave en la provisión de servicios ecosistémicos fundamentales, como la recarga de acuíferos, la captura de carbono, la regulación del microclima y la conservación de la biodiversidad (UAM, 2021).

A pesar de su importancia, el Suelo de Conservación (SC) de la Ciudad de México ha enfrentado diversas amenazas, entre las cuales destacan el crecimiento urbano descontrolado, los asentamientos humanos irregulares, la tala clandestina, los incendios forestales y la expansión agrícola. Entre 2015 y 2020, se registraron más de 14,000 incendios forestales en estas zonas, los cuales afectaron una superficie superior a las 14,000 hectáreas, ejerciendo una presión considerable sobre los ecosistemas (Hernández et al., 2024).

Además, las políticas de conservación implementadas hasta ahora han tenido resultados limitados. Entre 2019 y 2023 se establecieron más de 43.5 millones de árboles, arbustos y vegetación herbácea en la ciudad, lo que permitió un incremento en el área verde por habitante al pasar de 14.5 m² en 2018 a 19.4 m² en 2023 (SEDEMA, 2023). Este aumento, aunque significativo, evidenció que las estrategias basadas únicamente en la reforestación resultan insuficientes si no se integran consideraciones sobre la calidad ecológica, el manejo adaptativo y la participación comunitaria

Por otra parte, el cambio climático ha representado una amenaza adicional para el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. De acuerdo con el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014–2020, se proyectó que entre 2030 y 2050 las temperaturas medias en la ciudad podrían incrementarse entre 1.5 y 2.5 °C, y que las precipitaciones podrían disminuir hasta en un 20 % durante los meses más secos (Gobierno de la Ciudad de México, 2014). Tales cambios climáticos no solo comprometen la biodiversidad y la salud de los ecosistemas, sino también la disponibilidad hídrica y la resiliencia del territorio frente a eventos extremos.

En este contexto, la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, ubicada en la Alcaldía de Tlalpan, adquiere una importancia estratégica. Sus bosques, dominados por especies como *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus montezumae* Lamb. y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., actúan como importantes sumideros de carbono y cumplen funciones vitales para la regulación

hídrica y el bienestar de las comunidades locales (Galeana-Pizaña, Martínez-Ramos, & Rendón-Aguilar, 2013).

Para asegurar su conservación y aprovechar su potencial climático, resulta indispensable contar con información científica sólida sobre su capacidad de captura de carbono. Esta información permitirá sustentar proyectos de manejo sustentable y restauración ecológica, así como evaluar su posible incorporación en esquemas de financiamiento climático, como los mercados voluntarios de carbono.

Por lo anterior, y entendida la importancia de los servicios ambientales de los bosques del Suelo de Conservación de la Ciudad de México, la necesidad de contar con información confiable para su evaluación constituye la justificación del presente trabajo, cuyos objetivos fueron estimar el contenido y la captura potencial de carbono en los bosques de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, con la finalidad de contribuir a la implementación de proyectos que favorezcan a la comunidad local y promuevan un aprovechamiento diversificado y sustentable de los recursos forestales existentes.

1.3. Objetivos de la Investigación

Con base en el planteamiento del problema y la justificación del estudio, se establecieron los siguientes objetivos:

1.3.1. Objetivo General

Estimar el contenido y la captura potencial de carbono aéreo en los bosques de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, mediante la aplicación parcial de la metodología del Protocolo Forestal para México v3.0 para que la comunidad cuente con información oportuna y detallada que les permita gestionar proyectos futuros.

1.3.2. Objetivos Particulares

- Identificar las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México.
- Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono aéreo en 100 hectáreas de bosque dentro de la reserva.
- Calcular el potencial de captura de carbono aéreo en el área de estudio, con base en modelos de proyección.
- Desarrollar una Guía Técnica que permita a las comunidades y ejidos en México involucrarse en el mercado de carbono y en proyectos de conservación forestal.

1.4. Hipótesis

El reconocimiento del valor del carbono almacenado en los ecosistemas forestales de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, a través de su estimación técnica y su posible integración en esquemas de financiamiento climático, favorece el interés y la participación de las comunidades en acciones de conservación y manejo forestal sustentable, generando oportunidades económicas locales asociadas al mercado de carbono.

1.5. Contenido temático del Documento de Titulación

El presente documento se estructura en cinco capítulos, organizados para dar cumplimiento a los lineamientos establecidos por la Universidad Autónoma Chapingo, así como para facilitar la exposición ordenada del problema, la metodología aplicada y los principales hallazgos del estudio.

El CAPÍTULO I expone la Introducción General, en la que se presenta el contexto y la relevancia del problema, los antecedentes y justificación, así como los objetivos e hipótesis de la investigación.

El CAPÍTULO II desarrolla la Revisión de Literatura, con el propósito de sustentar teóricamente el estudio. Se analizan investigaciones previas relacionadas con la

captura de carbono en bosques como estrategia de mitigación del cambio climático, así como los principales proyectos, programas y mecanismos nacionales e internacionales vinculados con este objetivo. Asimismo, se revisan diversas metodologías utilizadas para la estimación de biomasa y carbono, desde modelos alométricos hasta técnicas de medición en campo y proyecciones de captura, integrando enfoques tradicionales y tecnológicos.

El CAPÍTULO III presenta la Metodología de la investigación, en donde se describen el área de estudio, el diseño de muestreo, las variables evaluadas, los criterios de inclusión de especies, las ecuaciones alométricas utilizadas, así como los métodos de análisis estadísticos aplicados. También se detalla el enfoque complementario para el desarrollo de una Guía Técnica orientada a comunidades y ejidos interesados en participar en esquemas de financiamiento climático.

El CAPÍTULO IV contiene los Resultados de la investigación. Se presentan los resultados de los primeros valores estimados de biomasa y carbono aéreo en el bosque de pino-encino de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, así como la proyección de su potencial de captura a lo largo del tiempo. Este capítulo incluye además un análisis de los factores ecológicos y antrópicos que influyen en dicha capacidad de captura.

Finalmente, el CAPÍTULO V, se presentan los resultados del objetivo 4 referente al desarrollo de una Guía Técnica que permita a las comunidades y ejidos en México involucrarse en el mercado de carbono y en proyectos de conservación forestal.

1.6. Literatura Citada

- Carpinteyro-Urbán, S. (2014). El potencial natural de la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo para su uso turístico. *Agro Productividad*, 7(4), 50–56.
https://www.researchgate.net/publication/316492654_El_potencial_natural_de_la_Reserva_Ecologica_Comunitaria_San_Miguel_Topilejo_para_su_uso_turistico
- Climate Action Reserve (CAR). (2022). Protocolo forestal para México, versión 3.0. https://climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2022/06/Mexico-Forest-Protocol-V3.0-WG-Draft_ESP.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Apoyos CONAFOR. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/apoyos-conafor>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). Mecanismos nacionales e internacionales de pagos por servicios ambientales. <https://www.monitoreoforestal.gob.mx/repositorioidigital/files/original/dd542543089a388798fe0cbcd3692c9.pdf>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2020). Pobreza por localidad urbana, 2020. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Pobreza_municipal/2020/pob_loc_urbana/Sintesis_pobreza_localidad_entidades_2020.pdf
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. FAO. <https://www.fao.org/3/ca9825es/CA9825ES.pdf>

- Galeana-Pizaña, J. M., Martínez-Ramos, M., & Rendón-Aguilar, B. (2013). El sistema de conservación comunitaria de San Miguel Topilejo: Un modelo alternativo de gobernanza forestal en suelo de conservación. Quivera. Revista de Estudios Territoriales, 15(2), 35–53. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/dc5791ce-8245-4b97-bdad-c37a5a0db914/200220.pdf>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2007). Decreto por el que se establece como Área Natural Protegida, con la categoría de Reserva Ecológica Comunitaria, la zona conocida como "San Miguel Topilejo". <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/595/15e/6f9/59515e6f934c1654991881.pdf>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (5ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://sistemasproduccionagricola993.jimdofree.com/app/download/12472554357/CLASIF.+CLIMATICA+RM.pdf?t=1695056501>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2014). Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164914/PACCM-2014-2020completo.pdf>
- Hernández Benavides, M. de los Ángeles, Andrews, M. N., & Vilches-Blázquez, L. M. (2024). El acoso al suelo de conservación de la Ciudad de México a través de los incendios forestales. Revista De Geografía Norte Grande, (88). <https://doi.org/10.4067/S0718-34022024000200108>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Conjunto de datos vectoriales de regiones hidrológicas, escala 1:250 000. Serie V. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463932212>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate change 2023: Synthesis report – Summary for policymakers.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SP_M.pdf

Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT). (2002). El Suelo de Conservación del Distrito Federal. <https://paot.org.mx/centro/programas/suelo-corena.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). Mercado Voluntario de Carbono en México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/943747/xxxxMercadoVoluntariodeBonosdeCarbono.pdf>

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2016). Programa de conservación del Suelo de Conservación de la Ciudad de México 2016–2020. Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/ecusbe-cdmx-3.pdf>

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2023). Reconstruye Sedema venas verdes de la Ciudad de México. <https://sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/reconstruye-sedema-venas-verdes-de-la-ciudad-de-mexico>

Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). (2021). Propuesta para una gestión integral del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/25bc096b-3995-4da3-a7bc-36a66960cd82/cyadCD300524202025czaf.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (s.f.). Kyoto Protocol. https://unfccc.int/kyoto_protocol

Verra. (2022, diciembre). VCS in compliance markets.
<https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/vcs-in-compliance-markets/>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Estudios más relevantes sobre captura de carbono como estrategia para combatir los efectos del Cambio Climático

2.1.1. Contexto global de la captura de carbono

El cambio climático constituye uno de los desafíos ambientales más significativos del siglo XXI, con impactos globales que afectan los sistemas ecológicos, económicos y sociales. La comunidad científica ha documentado con amplitud que el aumento de la temperatura media global está directamente relacionado con la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxidos de nitrógeno (NO_x). De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), durante el periodo 2011–2020, la temperatura promedio global fue 1.1 °C más alta en comparación con los niveles preindustriales, como resultado del incremento en las emisiones antropogénicas de GEI.

Las emisiones de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y las prácticas industriales han sido identificadas como las principales causas del calentamiento global (IPCC, 2023). En este contexto, la captura y almacenamiento de carbono (CAC) ha adquirido relevancia como estrategia de mitigación, al permitir reducir la concentración de CO_2 en la atmósfera a través de procesos naturales o tecnológicos.

Dentro de las soluciones basadas en la naturaleza, los ecosistemas forestales han demostrado una capacidad significativa para actuar como sumideros de carbono, al absorber CO_2 mediante la fotosíntesis y almacenarlo en la biomasa aérea, subterránea y en el suelo. Según datos de la FAO (2020), los bosques del planeta almacenan aproximadamente 662 gigatoneladas de carbono, lo que representa más de la mitad de las reservas globales de este elemento.

La capacidad de captura de carbono de los ecosistemas forestales depende de múltiples factores, entre los que destacan el tipo de vegetación, el estado de conservación, la edad del bosque, la productividad primaria neta y las

condiciones edáficas y climáticas. Adicionalmente, la conservación, restauración y manejo sustentable de estos ecosistemas contribuyen no solo a la mitigación del cambio climático, sino también a la provisión de servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica, la protección de la biodiversidad y el mantenimiento del suelo.

El reconocimiento del papel estratégico de los bosques ha llevado a su inclusión en mecanismos internacionales de financiamiento climático, tales como REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques), y en los mercados voluntarios de carbono, donde la captura y almacenamiento de carbono puede ser cuantificado, verificado y valorizado económicamente mediante créditos de carbono.

2.1.2. Captura de carbono en América Latina

América Latina se ha consolidado como una región clave para la captura de carbono, debido a la vasta extensión de sus bosques tropicales y su elevado potencial de almacenamiento. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los bosques de América Latina y el Caribe almacenan aproximadamente 662,000 millones de toneladas de carbono, lo que representa más de la mitad de las reservas de carbono mundiales acumuladas en suelos y vegetación (FAO, 2022).

Brasil ha sido pionero en la implementación de estrategias de captura de carbono basadas en la conservación forestal. Un ejemplo destacado es el Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la Amazonía Legal (PPCDAm), establecido en 2004, el cual logró reducir la deforestación en la Amazonía brasileña en un 83 % entre 2004 y 2012, evitando la emisión de aproximadamente 4.2 gigatoneladas de CO₂ (WWF, 2015).

En el caso de Colombia, se han implementado programas como Bosques Territorios de Vida, orientados a la conservación de ecosistemas estratégicos y a la generación de créditos de carbono mediante proyectos REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques). Estos proyectos tienen

como propósito no solo mitigar el cambio climático, sino también fortalecer la biodiversidad y mejorar las condiciones de vida de las comunidades locales (CEPAL, 2012).

De manera similar, Perú y Ecuador han puesto en marcha iniciativas relevantes para la conservación de bosques y la captura de carbono. En Perú, el Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático, creado en 2010, ha logrado proteger más de 2.7 millones de hectáreas de bosques primarios, a través del trabajo conjunto con comunidades nativas y campesinas en la promoción de actividades productivas sostenibles (MINAM, 2020). En Ecuador, el programa Socio Bosque, coordinado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, otorga incentivos económicos a comunidades indígenas y propietarios privados para conservar los bosques nativos y prevenir su degradación (MAATE, 2020).

Las iniciativas de captura de carbono en América Latina reflejan un compromiso regional con la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad. Programas como los implementados en Brasil, Colombia, Perú y Ecuador demuestran que, mediante políticas públicas adecuadas y la participación de las comunidades locales, es posible reducir la deforestación, promover el desarrollo sostenible y contribuir de manera significativa al cumplimiento de los objetivos climáticos globales. Estas experiencias representan modelos replicables para otras regiones que enfrentan desafíos similares.

2.1.3. Contexto nacional: Captura de carbono en México

México cuenta con una notable diversidad de ecosistemas forestales y costeros que desempeñan un papel fundamental en la captura y almacenamiento de carbono, lo que contribuye de manera significativa a las estrategias nacionales de mitigación del cambio climático. De acuerdo con el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFiS), más de 64 millones de hectáreas del territorio nacional corresponden a terrenos forestales permanentes, los cuales poseen un importante potencial de secuestro de carbono (CONAFOR, 2020).

Entre los ecosistemas más relevantes para este proceso destacan los manglares. Kauffman et al. (2011) estimaron que los manglares y marismas del Área Natural Protegida Pantanos de Centla, en el estado de Tabasco, pueden almacenar entre 400 y 600 toneladas de carbono por hectárea. Estos valores posicionan a dichos humedales como reservorios estratégicos de carbono tanto a nivel nacional como internacional.

Por su parte, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2017) identificó diversas zonas costero-marinas del país con alta capacidad de captura de carbono, denominadas “zonas de carbono azul”. Entre ellas se incluyen regiones del Pacífico, el Golfo de México y la Península de Yucatán, donde los manglares, marismas y pastos marinos actúan como sumideros naturales con un papel relevante en las políticas de mitigación.

En el ámbito institucional, México ha desarrollado mecanismos técnicos y financieros para fortalecer la conservación y el aprovechamiento de estos ecosistemas. Entre los más destacados se encuentran los programas de pagos por servicios ambientales (PSA), promovidos por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), así como metodologías de valoración económica asociadas a la captura de carbono (CONAFOR, 2014). Estos instrumentos buscan incentivar la participación comunitaria en prácticas sostenibles, articulando objetivos de mitigación con el desarrollo local.

En este sentido, México posee un alto potencial para la captura de carbono, respaldado por la diversidad ecológica de su territorio y por los avances en materia de herramientas técnicas, normativas y metodológicas. No obstante, persisten retos importantes relacionados con la deforestación, el cambio de uso de suelo y la escasa vinculación efectiva entre las comunidades locales y los mercados de carbono. Consolidar mecanismos de financiamiento climático, tales como los pagos por servicios ambientales y los protocolos de certificación voluntaria, resulta esencial para escalar estas estrategias y asegurar que los beneficios derivados de la captura de carbono contribuyan tanto al cumplimiento

de las metas nacionales de mitigación como al bienestar social y ambiental de los territorios en los que se implementan.

2.2. Proyectos y programas en materia de estimación de captura de carbono

2.2.1. Contexto global de los proyectos de estimación de captura de carbono

La creciente preocupación por el cambio climático ha impulsado, desde finales del siglo XX, el desarrollo de programas y mecanismos internacionales orientados a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), destacando el papel estratégico de la conservación y restauración de bosques como sumideros naturales de carbono.

En 1985, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) implementó el Plan de Acción Forestal Tropical (Tropical Forestry Action Plan, TFAP), con el propósito de promover la gestión forestal sostenible en países tropicales, reduciendo las emisiones asociadas a la deforestación y fomentando simultáneamente el desarrollo rural (FAO, 1985).

Posteriormente, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), establecida en 1992, reconoció formalmente a los ecosistemas forestales como sumideros esenciales de carbono, incorporando su manejo sostenible dentro de los compromisos internacionales para enfrentar el cambio climático (UNFCCC, 1992). En ese marco, el Protocolo de Kioto, firmado en 1997, introdujo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el cual permitió a los países industrializados invertir en proyectos de captura de carbono en naciones en desarrollo, particularmente mediante actividades de reforestación, restauración de suelos degradados y manejo forestal sustentable (UNFCCC, 1998).

En 2005, se lanzó el programa REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques), que en 2007 se amplió a REDD+, incorporando elementos adicionales como la conservación, el aumento de las

reservas de carbono y el manejo sostenible de los bosques (UN-REDD Programme, 2018). Estas iniciativas fortalecieron el vínculo entre la mitigación del cambio climático y la gestión forestal a nivel local, nacional y regional.

Paralelamente, se consolidaron mecanismos de financiamiento climático, entre los que destaca el Fondo Verde para el Clima (Green Climate Fund, GCF), establecido en 2010 con el objetivo de apoyar acciones de mitigación y adaptación en países en desarrollo, particularmente en sectores como el forestal, el agrícola y el energético (GCF, 2021).

En apoyo a estos compromisos, han surgido plataformas tecnológicas que facilitan el monitoreo, reporte y planificación de estrategias nacionales. Herramientas como Global Forest Watch, desarrollada por el World Resources Institute (2020), y plataformas como NDC Partnership del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2020), permiten a los países dar seguimiento a sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), incorporando acciones de captura y almacenamiento de carbono en sus estrategias de desarrollo sostenible.

2.2.2. Proyectos de captura de carbono en América Latina

América Latina, gracias a su vasta biodiversidad y a la presencia de extensas áreas forestales, desempeña un papel estratégico en los esfuerzos globales por mitigar el cambio climático a través de la captura y almacenamiento de carbono. Diversos países de la región han implementado proyectos y programas enfocados en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la conservación, restauración y gestión sostenible de sus ecosistemas.

En Colombia, se ha explorado el potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en la subcuenca del río Munguidó, en el departamento del Chocó. Un estudio reciente analizó dos estrategias principales: la conservación de bosques primarios para evitar emisiones por deforestación y la implementación de sistemas agroforestales con cacao en áreas de bosque secundario. Los resultados indicaron que ambas estrategias pueden contribuir significativamente

a la mitigación del cambio climático, al tiempo que fortalecen el desarrollo sostenible de las comunidades locales (Mosquera et al., 2021).

Costa Rica se ha consolidado como uno de los países pioneros en la implementación de mecanismos de Pago por Servicios Ambientales (PSA), incorporando formalmente el reconocimiento del valor de la captura de carbono en su legislación forestal. Estos programas han incentivado la conservación de bosques naturales y la reforestación, promoviendo la reducción de emisiones y la sostenibilidad ambiental y social del país (Porrás et al., 2008).

En el caso de México, se han desarrollado proyectos forestales orientados a la captura de carbono bajo estándares reconocidos a nivel internacional, como el Verified Carbon Standard (VCS) de Verra. Dichos proyectos contemplan actividades como la reforestación, el manejo forestal sustentable y la restauración ecológica, generando créditos de carbono comercializables en mercados voluntarios, lo que permite vincular la conservación con mecanismos de financiamiento climático (México2, 2019).

A nivel regional, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha impulsado diversas iniciativas para fomentar el financiamiento climático en América Latina y el Caribe, con el objetivo de promover economías resilientes y bajas en carbono. Estas acciones se han alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) asumidas en el marco del Acuerdo de París (Molina-Perez et al., 2021).

En conjunto, estas experiencias reflejan el compromiso creciente de América Latina con la mitigación del cambio climático, y subrayan la relevancia de la colaboración entre gobiernos, comunidades locales, organismos multilaterales y actores del sector privado para el diseño e implementación de estrategias efectivas de captura de carbono que generen beneficios ambientales, económicos y sociales.

2.2.3. Proyectos de captura de carbono en México

Desde principios de la década de 1990, México se incorporó a iniciativas internacionales orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), comenzando con su adhesión a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En 1997, se adoptó el Protocolo de Kioto, el cual estableció el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), permitiendo a los países en desarrollo implementar proyectos para reducir emisiones y generar créditos de carbono comercializables (CMNUCC, 1998). México ratificó el Protocolo de Kioto en el año 2000 y, desde entonces, ha implementado numerosos proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), centrados principalmente en los sectores de energías renovables, eficiencia energética, manejo de residuos y recuperación de (SEMARNAT, 2023).

Desde su adhesión al Protocolo de Kioto, México ha adoptado múltiples estrategias para reducir sus emisiones de GEI, consolidándose como uno de los países más activos en materia de política climática en América Latina. En 2014, el país introdujo un impuesto al carbono, convirtiéndose en pionero regional al aplicar una medida fiscal que grava los combustibles fósiles con base en su contenido de carbono, con excepción del gas natural (MÉXICO2, 2022). Esta política tuvo como finalidad incentivar la transición hacia fuentes de energía limpias y promover la eficiencia energética.

Posteriormente, en 2019 se puso en marcha el Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones (SCE), un mecanismo de “tope y comercio” que establece límites máximos de emisiones para sectores industriales seleccionados. Este sistema permite a las empresas comprar o vender derechos de emisión en función de su desempeño ambiental (SEMARNAT, 2021). Ambas políticas forman parte de la estrategia nacional para alcanzar las metas climáticas establecidas en la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), actualizada en 2022, que plantea una reducción del 35 % de emisiones de GEI para el año 2030, de las cuales un 22 % son de carácter incondicional (SEMARNAT & INECC, 2022).

Derivado de este contexto, México ha desarrollado diversas iniciativas enfocadas en la captura y reducción de emisiones de carbono, muchas de ellas con participación directa de comunidades locales y organizaciones no gubernamentales. Un ejemplo destacado es el proyecto implementado en la comunidad de San Jerónimo Zacapexco, en el municipio de Villa del Carbón, Estado de México. Desde 2018, esta comunidad ha conservado más de 10,000 hectáreas de bosque templado con capacidad de captación de dióxido de carbono, generando créditos de compensación vendidos a empresas extranjeras. Esto ha resultado en beneficios económicos y sociales tangibles para la población local (Mongabay Latam, 2022).

Otra iniciativa relevante es el Programa de Carbono Forestal Familiar, lanzado en 2021 por The Nature Conservancy. Este programa tiene como objetivo involucrar a propietarios de bosques familiares en prácticas de manejo sustentable que favorezcan la captura de carbono, y hasta la fecha ha permitido la captura de más de un millón de toneladas de CO₂ equivalente (The Nature Conservancy, 2025).

Asimismo, la organización Climate Action Reserve desarrolló el Protocolo Forestal para México, cuya versión 3.0 fue adoptada oficialmente el 5 de octubre de 2022. Este protocolo proporciona lineamientos técnicos para proyectos de captura de carbono en ecosistemas forestales, facilitando su registro en mercados voluntarios de carbono, al tiempo que promueve la conservación y el manejo sustentable de los bosques del país (Climate Action Reserve, 2022).

En conjunto, estas experiencias evidencian el compromiso de México con la implementación de programas destinados a la captura y reducción de carbono, abarcando desde políticas públicas de alcance nacional hasta iniciativas comunitarias. No obstante, persiste la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo, reporte y evaluación para asegurar la eficacia y transparencia de estos programas. Igualmente, es fundamental garantizar que los beneficios económicos derivados de la venta de créditos de carbono se distribuyan de

manera equitativa entre las comunidades participantes, fomentando una gobernanza ambiental justa, inclusiva y orientada al bienestar local.

2.3. Metodologías para estimación y captura de carbono

La estimación de la captura y almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales constituye una estrategia fundamental para la mitigación del cambio climático, dado que permite cuantificar con precisión la contribución de los bosques como sumideros naturales. A nivel global, se han desarrollado diversos enfoques metodológicos que combinan mediciones de campo, ecuaciones alométricas, tecnologías de percepción remota y modelos estadísticos, con el objetivo de generar información robusta y comparable sobre las reservas de carbono en diferentes tipos de vegetación.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha liderado la estandarización de estas metodologías a través de sus Directrices metodológicas para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, publicadas inicialmente en 2006 y actualizadas en 2019. Estas directrices clasifican los métodos en tres niveles de complejidad:

Nivel 1, basados en factores de emisión por defecto y datos globales;

Nivel 2, emplean factores de emisión específicos por país y datos nacionales;

Nivel 3, integran modelos, datos geoespaciales y mediciones directas (IPCC, 2019).

Estos niveles permiten a los países seleccionar el enfoque más adecuado según sus capacidades técnicas. En el sector forestal, las directrices del IPCC contemplan el análisis de cinco principales reservorios de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta y carbono orgánico del suelo. Las estimaciones pueden realizarse a partir de inventarios forestales nacionales, parcelas de muestreo, sensores remotos y herramientas de modelación ecológica.

La FAO, mediante la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA), ha contribuido al desarrollo de metodologías que integran datos de campo y sensores satelitales para estimar la superficie forestal, las tasas de deforestación y la biomasa acumulada (FAO, 2020). Esta combinación de fuentes ha demostrado ser útil para obtener resultados más precisos y consistentes a escala regional y nacional.

En el caso de México, el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), coordinado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), representa el instrumento técnico más relevante. Este inventario utiliza un muestreo sistemático basado en parcelas permanentes distribuidas a lo largo del territorio nacional. En cada unidad de muestreo se registran variables como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total, la condición del árbol, el tipo de cobertura y la pendiente del sitio, lo que permite estimar la biomasa aérea y, con base en factores de conversión, el contenido de carbono (CONAFOR, 2013).

Adicionalmente, México ha adoptado el Protocolo Forestal para México v3.0, desarrollado por la organización Climate Action Reserve. Este protocolo establece lineamientos específicos para el desarrollo de proyectos forestales en el marco de los mercados voluntarios de carbono. Entre sus componentes metodológicos destacan: el uso de ecuaciones alométricas validadas por especie, la medición directa de biomasa, la aplicación de tasas de expansión para calcular el volumen con y sin corteza, la densidad de la madera, el factor de carbono (generalmente 0.5) y su conversión a CO₂ equivalente (Climate Action Reserve, 2022). El protocolo también contempla el establecimiento de parcelas permanentes, la medición periódica y la aplicación de tasas de descuento para estimaciones proyectadas.

En años recientes, el uso de tecnologías avanzadas como LiDAR (Light Detection and Ranging) han revolucionado la estimación del carbono forestal. Esta tecnología permite obtener una caracterización tridimensional de la estructura del dosel, facilitando cálculos de volumen forestal, biomasa y carbono con alta resolución espacial y precisión. Iniciativas como la Global Forest Observations

Initiative (GFOI) han promovido el uso de sensores remotos, imágenes satelitales y modelos estadísticos avanzados para fortalecer las capacidades nacionales en monitoreo, reporte y verificación (GFOI, 2020).

Otras herramientas emergentes incluyen el uso de modelos de simulación del crecimiento forestal, que permiten proyectar la acumulación de carbono a lo largo del tiempo bajo diferentes escenarios de manejo o conservación. Estos modelos, a menudo calibrados con datos de parcelas permanentes, pueden ajustarse mediante regresiones lineales o no lineales, análisis de curvas sigmoideas o técnicas de aprendizaje automático, dependiendo de la complejidad del ecosistema y la disponibilidad de datos.

En conjunto, la diversidad metodológica disponible ofrece a los países y organizaciones una base técnica sólida para estimar con mayor precisión el carbono almacenado en los ecosistemas forestales. La aplicación rigurosa y contextualizada de estas herramientas es indispensable para sustentar políticas de mitigación del cambio climático, acceder a mecanismos de financiamiento climático y fomentar estrategias de conservación efectivas y socialmente justas.

2.4. Literatura citada

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>

Bastin, J., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>

Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320(5882), 1456–1457. <https://doi.org/10.1126/science.1155458>

Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2019). The potential of forests for climate change mitigation through carbon sequestration. *Nature Communications*, 10, Article 397. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08833-0>

CATF. (2022, abril 4). ¿Qué dice el último informe del IPCC sobre la captura de carbono? *Clean Air Task Force*. <https://www.catf.us/es/2022/04/what-does-latest-ipcc-report-say-about-carbon-capture/>

CEPAL. (2012). *Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques (REDD+) en los países de América Latina: Requerimientos institucionales y jurídicos para su implementación*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3995/S2012056_es.pdf

Climate Action Reserve. (2022). *Protocolo Forestal para México Versión 3.0*. https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2022/06/Mexico-Forest-Protocol-V3.0-WG-Draft_ESP.pdf

Climate Tracker. (2022). Bonos de carbono siembran abusos en México. <https://climatetrackerlatam.org/historias/bonos-de-carbono-siembran-abusos-en-mexico/>

- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2013). *Procedimientos de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. https://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodologicos/2013/Anexo_procedimientos_muestreo_2013.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). *Conceptualización de las metodologías de valoración económica y pago por servicios ambientales en México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191465/Conceptualizacion_PSA_04.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). *Resultados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004–2018*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/C002905.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). *Monitoreo de recursos forestales en México: Avances del INFyS*. <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). *Sistema Nacional de Monitoreo Forestal*. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/sistema-nacional-de-monitoreo-forestal>
- FAO. (1985). *Tropical Forestry Action Plan*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/4/r7750e/r7750e06.htm>
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>

- FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022: Vías forestales para una recuperación verde y resiliente*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/cb9363es/cb9363es.pdf>
- Gobierno de México. (2023). Protocolo de Kioto sobre cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico>
- Global Forest Observations Initiative. (2022). Methods and guidance documentation (MGD) 3.1. REDDcompass. <https://www.reddcompass.org/mgd/resources/GFOI-MGD-3.1-en.pdf>
- Green Climate Fund (GCF). (2021). *About the Green Climate Fund*. <https://www.greenclimate.fund/about>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2017). *Estudio para la identificación, caracterización y evaluación del balance entre las emisiones de GEIs y las zonas de captura y almacenamiento de carbono en zonas de ecosistemas costero-marinos del Pacífico, Golfo de México y la Península de Yucatán (Carbono azul)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/444387/CGACC_2017_Balance_entre_las_emisiones_de_GEIs_y_las_zona_de_captura_y_almacenamiento_de_carbono_en_zonas_de_ecosistemas_costero-marinos_del_Pacifico_Golfo_de_Mexico_y_Yucatan.pdf
- INECC. (2022). *Impacto del cambio climático en ecosistemas forestales de México*. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/impacto-del-cambio-climatico-en-ecosistemas-forestales-de-mexico>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1992). *Cambio climático 1992: El suplemento del IPCC al informe científico de 1990*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono: Informe especial del IPCC*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate change 2023: Synthesis report – Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SP_M.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers*. Sixth Assessment Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf

Kauffman, B., Hernández Trejo, H., García, M. del C. J., Heider, C., & Contreras Sánchez, W. M. (2011). *Cálculo de las reservas de carbono en los ecosistemas de marismas y manglares de Pantanos de Centla, México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD003595.pdf>

MAATE. (2020). *Programa Socio Bosque*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/programa-socio-bosque/>

México2. (2019). *Proyectos forestales de captura de carbono CAR-VCS/Verra*. <https://www.mexico2.com.mx/uploads/mexico/CARVERRA.pdf>

México2. (2022). *Impuestos al carbono en México: Desarrollo y tendencias*. Plataforma Mexicana de Carbono. <https://www.mexico2.com.mx/uploads/mexico/file/Impuestos%20al%20car>

bono%20en%20M%C3%A9xico%20-
%20desarrollo%20y%20tendencias.pdf

MINAM. (2020). *Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.gob.pe/bosques>

Molina-Pérez, E., et al. (2021). *Costos y beneficios de lograr la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/external_publications/EP70000/EP70328/RAND_EP70328.spanish.pdf

Mongabay Latam. (2022). México: Comunidad que producía carbón ahora recibe recursos por mitigar el cambio climático. <https://es.mongabay.com/2022/06/comunidad-que-producia-carbon-ahora-recibe-recursos-por-mitigar-el-cambio-climatico-en-mexico/>

Mosquera, M., Vargas, J., & Rodríguez, N. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en la subcuenca del río Munguidó, Chocó, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(4), 1252–1264. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442021000401252&script=sci_arttext

Porras, I., Barton, D. N., Miranda, M., & Chacón-Cascante, A. (2008). *Pagos por carbono en América Latina: De la experiencia de proyectos piloto a la implementación a gran escala*. International Institute for Environment and Development. https://www.researchgate.net/publication/343796937_Pagos_por_carbono_en_America_Latina_de_la_experiencia_de_proyectos_piloto_a_la_implementacion_a_gran_escala

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021, octubre 22). *Programa de prueba del sistema de comercio de emisiones*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y->

programas/programa-de-prueba-del-sistema-de-comercio-de-emisiones-179414

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Contribución Determinada a Nivel Nacional: Actualización 2022*. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf

The Nature Conservancy. (2025). *Programa de carbono forestal familiar*. <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestras-prioridades/hacer-frente-al-cambio-climatico/programa-carbono-bosques-familiares/>

U3Explore. (2022). *Captura y almacenamiento geológico masivo de carbono como oportunidad estratégica, comercial y ambiental para Latinoamérica*. <https://www.u3explore.com/reports/captura-y-almacenamiento-geologico-masivo-de-carbono-como-oportunidad-estrategica-comercial-y-ambiental-para-latin-america>

UN-REDD Programme. (2018). *About REDD+*. Programa de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal. <https://www.un-redd.org/about>

UNFCCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

UNFCCC. (1998). *Protocolo de Kioto*. Naciones Unidas. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

United Nations Development Programme (UNDP). (2020). *NDC Partnership*. <https://ndcpartnership.org/>

World Resources Institute (WRI). (2020). *Global Forest Watch*. <https://www.globalforestwatch.org/>

WWF. (2015). *La Amazonía brasileña: Desafíos para alcanzar el cero deforestación y promover la producción sostenible*. Fondo Mundial para la Naturaleza.

https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/12mar2015_wwf_livingamazon_desafiosdesmatamentobrasil_esp_web.pdf

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, localizada al sur de la Ciudad de México, dentro de la Alcaldía Tlalpan. Esta zona forma parte del Suelo de Conservación, una franja estratégica para la provisión de servicios ecosistémicos en la capital. La reserva abarca aproximadamente 6,000 hectáreas, lo que representa una proporción significativa del Suelo de Conservación en la región (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2007).

El área de estudio se caracteriza por una alta diversidad ecológica. Se identifican diversos tipos de vegetación, entre ellos bosques de pino (*Pinus hartwegii* Lindl. y *Pinus montezumae* Lamb.), bosques mixtos de pino-encino (*Pinus*–*Quercus*), bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), pastizales de alta montaña y vegetación secundaria. Esta variedad ecosistémica contribuye a la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono y la regulación climática local (Carpinteyro-Urbán, 2014) ver Figura 1.

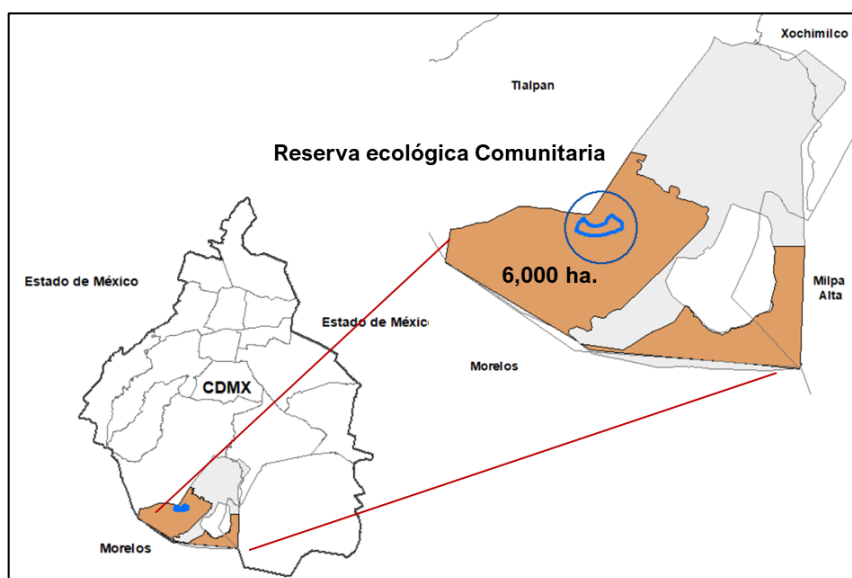


Figura 1. Ubicación de la comunidad de San Miguel Topilejo en la Ciudad de México y delimitación de la Reserva Ecológica Comunitaria

Desde el punto de vista geológico y edáfico, predominan los suelos de tipo litosol y andosol, caracterizados por una capacidad de infiltración media a alta. La geología de la zona está compuesta por formaciones de basaltos y tobas volcánicas fracturadas, que conforman suelos altamente permeables, fundamentales para la recarga de los acuíferos que abastecen al Valle de México (Carpinteyro-Urbán, 2014).

La comunidad de San Miguel Topilejo se ubica en una zona de intersección entre dos importantes regiones hidrológicas: la Región Hidrológica No. 26 del Río Pánuco, que abarca las subcuencas Texcoco y Zumpango; y la Región Hidrológica No. 18 del Río Balsas, que incluye las subcuencas del Río Apatlaco y del Río Yautepec (INEGI, 2017). Esta ubicación otorga a la reserva un papel relevante en el balance hídrico del Valle de México.

El clima predominante en la zona corresponde a un régimen templado subhúmedo con lluvias en verano, clasificado como Cwb según la clasificación de Köppen modificada por García. La temperatura media anual es de 13.7 °C, con variaciones de 10.6 °C en enero hasta 16.1 °C en mayo. La precipitación media anual es de 1,024 mm, condiciones que favorecen el desarrollo de comunidades forestales (García, 2004).

En cuanto a la tenencia de la tierra, la mayor parte del Suelo de Conservación de la Ciudad de México está constituido por propiedad social, en forma de ejidos y comunidades agrarias. Esta condición determina que las decisiones sobre el manejo y conservación del territorio recaigan principalmente en las propias comunidades. En delegaciones como Álvaro Obregón, Cuajimalpa y Magdalena Contreras, predominan las superficies comunales y ejidales, reforzando la importancia de los esquemas de gobernanza local (Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva de la Ciudad de México, 2023).

Este tipo de tenencia representa una oportunidad para implementar mecanismos de financiamiento ambiental como los mercados voluntarios de carbono y los pagos por servicios ambientales (PSA). Los primeros permiten a las comunidades propietarias de bosques comercializar créditos de carbono

generados a partir de actividades de conservación o reforestación, mientras que los PSA ofrecen compensaciones económicas por la provisión de servicios ambientales, incluyendo la captura de carbono, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad (SEMARNAT, 2025; CONANP, 2016).

Además, la comunidad de San Miguel Topilejo enfrenta retos socioeconómicos importantes. En 2020, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) reportó un alto Índice de Marginación Urbana para esta localidad, con menos del 80 % de las viviendas particulares habitadas con acceso a servicios básicos como agua entubada, energía eléctrica y drenaje. A ello se suma un nivel elevado de pobreza, lo que subraya la importancia de promover estrategias de conservación que generen beneficios sociales tangibles.

En este contexto, la conservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo no solo son clave para la mitigación del cambio climático y la seguridad hídrica de la Ciudad de México, sino también para el fortalecimiento del desarrollo sustentable y el bienestar de la población local

3.2. Enfoque metodológico general

La metodología de esta investigación se desarrolló con base en dos enfoques complementarios, seleccionados de acuerdo con la naturaleza de los objetivos particulares. El primer enfoque fue diseñado para caracterizar las condiciones ecológicas del bosque, y se basó en información proveniente de un muestreo comunitario previo y de fuentes secundarias oficiales. El segundo enfoque fue elaborado para la estimación cuantitativa del contenido y captura potencial de carbono, siguiendo parcialmente los lineamientos del Protocolo Forestal para México v3.0.

Esta estrategia metodológica diferenciada permitió abordar el estudio desde una perspectiva integral: por un lado, documentar la situación ecológica del sitio, y por otro, generar información cuantificable y proyectada sobre los servicios ecosistémicos asociados a la captura de carbono. La aplicación parcial del

Protocolo Forestal se debió a limitaciones técnicas identificadas en campo, como la imposibilidad de aplicar por completo la aplicación CALCBOSK y ciertas dificultades que se tuvieron con las muestras debido a su ruptura y pudrición.

3.3. Metodología para el Objetivo particular 1: Identificación de las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de san Miguel Topilejo

3.3.1. Caracterización ecológica del bosque

Recolección y análisis de información existente

Para la caracterización de las condiciones físicas y biológicas del bosque dentro de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, se utilizaron datos provenientes de un muestreo forestal realizado por la comunidad en 2022, así como información secundaria obtenida de estudios previos y fuentes oficiales como el INEGI, CONAFOR y SEDEMA. Esta caracterización se llevó a cabo para la totalidad de las aproximadamente 6,000 hectáreas que comprende la reserva, y permitió establecer una línea base ecológica del área de estudio.

Diseño del muestreo comunitario

Las 25 unidades de muestreo establecidas en 2022 fueron utilizadas como referencia para el análisis. Cada unidad tuvo una superficie de 1,000 m² (radio de 17.84 m), y se evaluaron tres estratos de vegetación:

Estrato arbóreo: individuos con un DAP $\geq$ 5 cm

Estrato arbustivo: especies con altura entre 0.5 y 2 m

Estrato herbáceo: especies con altura < 0.5 m

Las variables registradas incluyeron DAP, altura y cobertura para el estrato arbóreo, y número de individuos y cobertura por especie para los estratos inferiores.

Análisis espacial y delimitación de vegetación

El análisis espacial se realizó mediante fotointerpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro (2023) y la Carta de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII del INEGI (2018). Estos datos fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.8) para delimitar áreas forestales y clasificar comunidades vegetales, seleccionando únicamente los polígonos con cobertura forestal ubicados dentro del límite oficial de la reserva.

3.3.4 Evaluación de la riqueza y diversidad florística

Se identificó el número de familias, géneros y especies por parcela, y se aplicaron los estimadores Chao1 (Chao, 1984) y Bootstrap (Gotelli & Colwell, 2011) para predecir especies no observadas. Se generaron curvas de acumulación para evaluar el esfuerzo de muestreo. (Ecuaciones 1 y 2 del Cuadro 1)

Para medir la diversidad y dominancia se calcularon los índices de:

- Margalef (Margalef, 1958) (ver ecuación 3 en Cuadro 1)
- Shannon-Wiener (Magurran, 1988) (ver ecuación 2 en Cuadro 1)
- Simpson (Simpson, 1949) (ver ecuación 4 en Cuadro 1)

Asimismo, se evaluó la similitud florística entre parcelas mediante:

- Índice de Sorensen (Sorensen, 1948) (ver ecuación 5 en Cuadro 1)
- Coeficiente de Jaccard (Jaccard, 1901) (ver ecuación 6 en Cuadro 1)

Además, se utilizaron tres índices adicionales para caracterizar la estructura de la comunidad, como la abundancia relativa (Ar), la frecuencia relativa (Fr) y el índice de valor de importancia (IVI). (ver ecuaciones 7 a 9 del Cuadro 1) :

Los cálculos fueron realizados en Microsoft Excel 2016. Las fórmulas aplicadas se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Fórmulas aplicadas en el análisis de distribución y diversidad de especies.

No.	Ecuación	Parámetros
1	$S_n = a_n(1 + b_n)$	S_n = Número esperado de especies n = Esfuerzo de muestreo a = Tasa de incremento de nuevas especies b = Parámetro relacionado con la forma de la curva
1	$Chao_1 = S_{obs} + \frac{F^2}{2b}$	$Chao_1$ = Especies observadas F = Número de especies representadas por un único individuo b = Número de especies representadas por dos individuos S_{obs} = Número de especies observadas
2	$Dmg = \frac{S - 1}{\ln(N)}$	Dmg = Índice de Margalef s = Número de especies presentes $\ln$ = Logaritmo natural N = Número total de individuos
3	$H' = - \sum_i p_i \cdot \ln(p_i)$	H' = Índice de Shannon Wiener p_i = Abundancia relativa S = Número de especies presentes $\ln$ = Logaritmo natural
4	$D = \sum \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$	D = Índice de Simpson n_i = Número de individuos de la especie i N = Número total de individuos
5	$IS = \frac{2C}{A + B} \times 100$	IS = Índice de Sorensen A = Número de especies en el estrato A B = Número de especies en el estrato B C = Número de especies comunes en ambos estratos
6	$CJ = \frac{a}{a + b + c}$	CJ = coeficiente de Jaccard a = número de especies comunes en ambos sitios. b = número de especies presentes solo en el primer sitio. c = número de especies presentes solo en el segundo sitio
7	$Ar = \frac{n}{N} \times 100$	Ar = Abundancia relativa n = número de individuos de la especie i N = número total de individuos encontrados
8	$Fr = \frac{m}{N} \times 100$	Fr = Frecuencia relativa m = Presencia de la especie i en el sitio de muestreo M = Número total de sitios de muestreo

No.	Ecuación	Parámetros
9	$IVI=Ar+Fr+Dr$	IVI = Índice de Valor de importancia Ar = Abundancia relativa Fr = Frecuencia relativa Dr = Dominancia relativa

Fuente: Elaboración propia con base en Moreno (2001); Soberón & Llorente (1993); Magurrán (1988); Simpson (1949).

3.4. Metodología para los Objetivos particulares 2 y 3: Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono aéreo en 100 hectáreas de bosque dentro de la reserva y calcular el potencial de captura de carbono aéreo en el área de estudio, con base en modelos de proyección.

3.4.1. Diseño metodológico para la estimación y proyección de carbono

La metodología aplicada para los objetivos 2 y 3 se basó parcialmente en el Protocolo Forestal para México v3.0, desarrollado por Climate Action Reserve. La implementación parcial se debió a limitaciones técnicas, como la imposibilidad de aplicar completamente la aplicación CALCBOSK y la necesidad de utilizar métodos alternativos para proyecciones de captura de carbono, como modelos sigmoides.

El enfoque adoptado incluyó el establecimiento de parcelas permanentes, levantamiento de datos dasométricos, uso de ecuaciones alométricas específicas por especie, análisis estadístico del muestreo, conversión de biomasa a carbono y proyección del potencial de captura futura mediante modelos de crecimiento.

El área de estudio abarca 100 hectáreas dentro de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, en donde se establecieron 65 unidades de muestreo permanente (UMP). Cada unidad constó de dos parcelas anidadas: una de 400 m² para árboles con DAP ≥ 30 cm, y otra de 100 m² para árboles con DAP menores a 30 cm pero mayores a 5 cm, distribuidas aleatoriamente dentro de una malla de puntos de 25x25 m. Esto representó un total de 2.6 hectáreas de muestreo efectivo, equivalente a una intensidad del 2.6%.

Este nivel de intensidad se encuentra dentro del rango aceptable para estudios de biomasa y carbono forestal. Según Brown (1997), una intensidad de entre 1%

y 3% puede ser adecuada para bosques templados montanos cuando el diseño del muestreo es estadísticamente robusto. En este estudio, se aplicó un diseño de muestreo aleatorio estratificado, considerando tipo de vegetación, altitud y cobertura.

El error de muestreo se estimó mediante el cálculo del coeficiente de variación (CV):

$$CV = \left[\frac{S}{\bar{x}} \right] \times 100$$

donde:

CV es el coeficiente de variación

S es la desviación estándar de la variable medida (biomasa o densidad),

$\bar{X}$ es la media muestral correspondiente.

A partir del CV se calculó el error relativo (Er) con un nivel de confianza del 90%:

$$E_r = t \times \left(\frac{CV}{\sqrt{n}} \right)$$

donde:

t es el valor de la distribución t de Student para un nivel de confianza del 90% y n-1 grados de libertad,

n es el número total de parcelas.

El objetivo fue mantener el error de muestreo dentro de los límites recomendados por el IPCC (2006), que establece que las estimaciones de biomasa y carbono deben presentar un error inferior al 20% para ser consideradas confiables en inventarios forestales.

La biomasa aérea total (BAT) se estimó mediante las siguientes ecuaciones del Sistema Biométrico Forestal (CIBIFOR, 2024):

$$VTACC = a_0 \times D^{a_1} \times H^{a_2} + b_0 \times D^2$$

Donde:

VTACC: Volumen total con corteza (en m³)

D: Diámetro a la altura del pecho (DAP, en cm)

H: Altura total del árbol (en m)

a_0 , a_1 , a_2 , b_0 : Coeficientes específicos por especie, calibrados para cada especie.

El cuadro con coeficientes utilizados se presenta a continuación:

Cuadro 2. Coeficientes específicos por especie.

Especie	a_0	a_1	a_2	b_0/b_1	R^2	REMC
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	0.0000648	1.8742932	0.9601121	0.0000376	0.97	0.481
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	0.0000997	1.8021955	0.9035457	0.0000455	0.95	0.4336
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	0.000045	1.8243479	1.1434193	0.0000694	0.97	0.4376
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.0000544	1.9725836	0.9279744	0.0000934	0.95	0.255
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	0.0000285	1.8926818	1.1608098	0.000093	0.98	0.1027
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	0.0000789	1.8174251	0.9389619	0.0001676	0.89	0.2007

*REMC: Raíz del Error medio cuadrático

Fuente: Elaboración propia con base en información del Sistema Biométrico Forestal (CIBIFOR, 2024)

Una vez estimado el volumen total con corteza (VTACC) para cada árbol individual mediante las ecuaciones alométricas específicas por especie, el siguiente paso consistió en la conversión de este volumen a biomasa aérea total (BAT). Esta conversión se realizó con la fórmula:

$$BAT = VTACC \times \rho$$

donde:

BAT: Biomasa aérea total (en kg)

VTACC: Volumen total del árbol con corteza (en m³)

ρ : Densidad básica de la madera (en kg/m³), específica para cada especie

Las densidades básicas de la madera se asignaron a cada especie con base en fuentes confiables y datos validados de acuerdo con el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Densidades básicas de madera de las especies analizadas.

Especie	Densidad (g/cm ³)	Fuente
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	0.38	Sotomayor, 2005
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.49	Rojas-García & Villers-Ruiz, 2005
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	0.43	Zamora-Campos et al., 2007
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	0.46	U.S. Forest Service, 2023
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K. y <i>Alnus firmifolia</i> Fernald	0.44	Reyes-Santiago et al., 2015

Fuente: Elaboración propia con base en información de Sotomayor (2005); Rojas-García & Villers-Ruiz (2005); Zamora-Campos et al. (2007); U.S. Forest Service (2023); Reyes-Santiago et al. (2015).

Estas densidades se aplicaron de forma específica a cada árbol, dependiendo de su especie, lo que permitió transformar las estimaciones volumétricas en valores de biomasa aérea más precisos.

Una vez estimada la biomasa aérea total (BAT), se procedió a calcular el contenido de carbono aéreo (CA) mediante la aplicación de un factor de conversión estándar. Este factor, establecido por el IPCC (2006), asume que el 50% de la masa seca de la biomasa corresponde a carbono, por lo tanto:

$$CA = BAT \times 0.5$$

Posteriormente, con el fin de expresar el contenido de carbono en términos de potencial de mitigación climática, se realizó su conversión a dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}). Este cálculo se llevó a cabo utilizando el factor estequiométrico 3.67, que resulta de la relación entre la masa molecular del CO₂ (44 g/mol) y del carbono (12 g/mol) (IPCC, 2006; Brown, 1997; FAO, 2018):

$$CO_{2e} = CA \times 3.67$$

Esta doble conversión es ampliamente aceptada y aplicada en estudios científicos y programas internacionales de compensación de emisiones, permitiendo integrar los resultados del presente estudio a plataformas de

contabilidad de carbono como REDD+, programas de servicios ambientales o mercados voluntarios (FAO, 2018; Climate Action Reserve, 2020).

Para la estimación del carbono aéreo total por hectárea, el carbono por árbol (CA) se sumó dentro de cada unidad de muestreo ($CT_{parcela} = \sum CA_i$). Posteriormente, este valor se extrapoló a la escala del sitio completo utilizando la siguiente fórmula: $CT_{parcela} \times \left(\frac{A_{bosque}}{A_{parcela}} \right)$ donde $A_{parcela}$ es el área de la parcela y A_{bosque} es el área total del bosque. Este enfoque lineal fue validado por Chave et al. (2014) y Navar et al. (2004).

Una parte esencial del presente estudio fue estimar el potencial futuro de captura de carbono aéreo en los bosques de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo. Esta estimación permite evaluar el papel que tendrán estos ecosistemas en la mitigación del cambio climático a mediano y largo plazo, así como generar insumos estratégicos para orientar decisiones de manejo forestal sustentable y de participación en esquemas de servicios ambientales y mercados de carbono.

Debido a las limitaciones técnicas encontradas en campo, como la dificultad para obtener testigos completos por pudrición central o ruptura de las virutas, se optó por una estrategia alternativa basada en el ajuste de modelos de regresión no lineal de tipo sigmoidal. Este tipo de modelos ha sido ampliamente utilizado en estudios dendrométricos y de crecimiento forestal (Zeide, 1993; García, 2008), ya que permite representar de forma realista las curvas de crecimiento en diámetro y altura, las cuales suelen presentar una fase inicial lenta, seguida de un crecimiento acelerado y posteriormente una estabilización conforme los árboles alcanzan su madurez.

El modelo sigmoidal utilizado fue la función logística, expresada como:

$$y = \frac{\alpha}{1 + \exp\left(-\frac{x - \beta}{\gamma}\right)}$$

Donde:

y: variable respuesta (diámetro o altura del árbol).

x: edad o tiempo proyectado (años).

α : valor asintótico o crecimiento máximo esperado.

β : punto de inflexión de la curva.

γ : parámetro de escala que controla la pendiente de la curva.

Este modelo se ajustó utilizando el software R (versión 4.3.2), mediante funciones especializadas para regresión no lineal. Las proyecciones fueron realizadas a un horizonte de 25 años, y los valores resultantes de diámetro y altura por especie se reintrodujeron en las ecuaciones alométricas ya descritas para estimar anualmente el volumen total con corteza (VTACC), la biomasa aérea total (BAT), el contenido de carbono (CA) y el CO₂e acumulado.

La validez ecológica de las proyecciones se garantizó al utilizar tasas de crecimiento tomadas de literatura especializada compatible con las condiciones ecológicas del sitio (González-Espinosa et al., 2011; Pompa-García et al., 2009; Álvarez-Aquino et al., 2012), mientras que la validez estadística fue evaluada mediante análisis de residuos, inspección visual de los ajustes y coeficientes de determinación (R²).

Además, se calcularon estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, máximos y mínimos) para describir las trayectorias proyectadas de captura de carbono y analizar patrones estructurales en el crecimiento forestal. Este enfoque metodológico integral permitió generar resultados técnicamente sólidos, reproducibles y útiles para orientar estrategias de conservación, manejo forestal comunitario y participación en mercados de carbono y servicios ecosistémicos.

3.5. Literatura citada

- Alvarez-Aquino, C., & Williams-Linera, G. (2002). Seedling bank dynamics of *Fagus grandifolia* var. *mexicana* before and after a mast year in a Mexican tropical montane cloud forest. *Journal of Vegetation Science*, 13(2), 179–184. <https://doi.org/10.1111/j.1061-2971.2004.00398.x>
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer (FAO Forestry Paper 134). FAO. <http://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm>
- Carpinteyro-Urbán, S. (2014). El potencial natural de la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo para su uso turístico. *Agro Productividad*, 7(4), 50–56. https://www.researchgate.net/publication/316492654_El_potencial_natural_de_la_Reserva_Ecologica_Comunitaria_San_Miguel_Topilejo_para_su_uso_turistico
- Chao, A. (1984). Nonparametric estimation of the number of classes in a population. *Scandinavian Journal of Statistics*, 11(4), 265–270. <https://www.jstor.org/stable/4615964>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). Programa de Pago por Servicios Ambientales en Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programa-de-pago-por-servicios-ambientales-en-areas-naturales-protegidas?idiom=es>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2025). Anexo Técnico del Componente IV: Servicios Ambientales. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981361/AT_C-IV_SERVICIOS_AMBIENTALES__SA_.pdf

- FAO. (2018). Global Forest Resources Assessment 2020: Terms and Definitions. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/I8661EN/i8661en.pdf>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2007, 26 de junio). Decreto por el que se establece como Área Natural Protegida, con la categoría de Reserva Ecológica Comunitaria, la zona conocida con el nombre de “San Miguel Topilejo”. <https://paot.org.mx/centro/gaceta/2007/junio07/26junio07.pdf>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (5ª ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>
- González-Espinosa, M., Rey-Benayas, J. M., Ramírez-Marcial, N., Huston, M. A., & Meave, J. A. (2011). Los bosques de montaña en México: Amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible. *Ecosistemas*, 20(2), 36–51. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54020841005.pdf>
- Gotelli, N. J., & Colwell, R. K. (2011). Estimating species richness. En A. E. Magurran & B. J. McGill (Eds.), *Biological diversity: Frontiers in measurement and assessment* (pp. 39–54). Oxford University Press. <https://www.uvm.edu/~ngotelli/manuscriptpdfs/Chapter%204.pdf>
- Instituto de Planeación Democrática y Prospectiva de la Ciudad de México. (2023). Proyecto del Programa General de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México 2020–2035. <https://www.tjacdmx.gob.mx/images/convocatoria-indigena-2022/7.%20Proyecto%20Programa%20General%20de%20Ordenamiento%20Territorial%202020-2035.pdf>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

- Navar, J., Méndez, E., Nájera, A., Graciano, J., Dale, V., & Parresol, B. (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 59(4), 657–674. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.002>
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement* (pp. 84–98). Princeton University Press.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1, pp. 33–52). Zaragoza, España: M&T–Manuales y Tesis SEA.
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). Dendroecology and climate-growth relationships of relict *Pinus hartwegii* trees from central Mexico. *Tree-Ring Research*, 65(2), 97–105. <https://doi.org/10.3959/2008-9.1>
- Reyes-Santiago, J., Rodríguez-Ortiz, G., & Ángeles-Pérez, G. (2015). Densidad básica de la madera de diez especies del género *Quercus* en Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 21(1), 63–76. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211123>
- Rojas-García, F., & Villers-Ruiz, L. (2005). Densidad básica de la madera de especies forestales en México. *Madera y Bosques*, 11(1), 21–36. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.111124>
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(4148), 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Soberón, J., & Llorente, J. (1993). El uso de índices de similitud en biogeografía. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 64, 115–127.
- Sotomayor, J. A. (2005). Densidad de la madera de especies forestales en México. *Madera y Bosques*, 11(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.111123>
- U.S. Forest Service. (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL–GTR–282). U.S. Department of

Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
<https://research.fs.usda.gov/treesearch/62200>

Zeide, B. (1993). Analysis of growth equations. *Forest Science*, 39(3), 594–616.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/39.3.594>

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Introducción

Este capítulo presenta los principales hallazgos obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías descritas en el Capítulo 3. La estructura del capítulo responde directamente a los tres primeros objetivos particulares planteados en el proyecto: (1) Identificar las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México, (2) Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono aéreo en 100 hectáreas de bosque dentro de la reserva, y (3) Calcular el potencial de captura de carbono aéreo en el área de estudio, con base en modelos de proyección.

Los resultados presentados integran tanto datos primarios recolectados mediante parcelas de muestreo establecidas en campo, como análisis derivados de herramientas estadísticas, modelos alométricos, geoespaciales y de simulación. En cada sección se incluye una descripción cuantitativa y cualitativa de los hallazgos, acompañada de gráficos, cuadros, curvas y comparaciones con la literatura científica especializada.

La primera sección (en la página 48) está dedicada a la caracterización ecológica del sitio, donde se exponen los resultados sobre composición florística, riqueza y diversidad, estructura de los estratos vegetales y distribución espacial de las comunidades forestales, con base en un muestreo comunitario realizado en 2022 sobre una muestra representativa de las 6,000 hectáreas que integran la reserva.

La segunda sección (en la página 59) presenta la estimación del contenido de carbono aéreo almacenado actualmente en el bosque, utilizando ecuaciones alométricas específicas por especie, coeficientes de densidad de la madera y factores de conversión estandarizados. Esta estimación cubre un polígono de 100 hectáreas y fue realizada con una intensidad de muestreo del 2.6% bajo un diseño aleatorio estratificado, cumpliendo con los lineamientos técnicos del IPCC (2006).

Así mismo este apartado expone la proyección del potencial de captura de carbono aéreo para un periodo de 25 años, mediante el uso de modelos de crecimiento sigmoideal ajustados por especie. Esta simulación permite analizar el comportamiento dinámico del bosque bajo un escenario de continuidad ecológica, aportando elementos clave para evaluar la contribución del área al balance regional de carbono y su pertinencia para esquemas de pagos por servicios ambientales.

En todos los casos, los resultados son discutidos en relación con estudios previos realizados en ecosistemas templados de montaña en México y Latinoamérica, así como con los estándares metodológicos utilizados en proyectos de conservación y captura de carbono en contextos comunitarios. Esta aproximación integrada permite generar insumos técnicos confiables y contextualizados para fortalecer las estrategias de manejo forestal sustentable en San Miguel Topilejo.

4.2. Resultados del Objetivo 1: Identificación de las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México

El análisis florístico realizado en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo permitió identificar un total de 87 especies de plantas vasculares, distribuidas en 67 géneros y 38 familias. La familia Asteraceae destacó por su alta representatividad, seguida de Poaceae, Lamiaceae y Fabaceae. En cuanto a la composición arbórea, la familia Pinaceae fue predominante con especies clave como *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus hartwegii* Lindl. La familia Betulaceae incluyó diversas especies del género *Alnus*, mientras que Rosaceae, Salicaceae y Cupressaceae estuvieron representadas en menor proporción.

Este inventario florístico se obtuvo a partir de 25 unidades de muestreo (UM) de 1,000 m² cada una, lo que permitió establecer una línea base ecológica de la diversidad y estructura del bosque. La riqueza florística identificada evidencia la importancia ecológica del ecosistema y su valor para la conservación de la biodiversidad en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

4.2.1. Estrato arbóreo

Se identificaron 15 especies arbóreas pertenecientes a 10 géneros y 8 familias. Destaca la familia Pinaceae con cinco especies: *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus patula* Schltdl. & Cham. *Pinus montezumae* Lamb. fue la más abundante con 307 individuos.

Por otro lado, la familia Betulaceae estuvo representada por cuatro especies del género *Alnus*, entre las que destacan *Alnus acuminata* (Kunth), *Alnus firmifolia* Fernald y *Alnus jorullensis* H.B.K. De estas, *Alnus acuminata* (Kunth) fue la especie más numerosa, con 135 individuos. Además, la familia Salicaceae estuvo representada por las especies *Salix paradoxa* Diels y *Salix oxylepis* Bartram; mientras que otras familias como Ericaceae, Fagaceae y Cupressaceae también estuvieron presentes, contribuyendo a la diversidad del estrato arbóreo de la reserva.

4.2.2. Estrato arbustivo

En el estrato arbustivo se registraron 39 especies distribuidas en 27 géneros y 19 familias. La familia Asteraceae fue la más diversa, con 9 especies y 308 individuos (23.08%). La especie más abundante fue *Roldana angulifolia* (DC.) H.B. Kearns, con 175 individuos. La familia Caprifoliaceae, representada por *Symphoricarpos microphyllus* (Kunth) M. E. Jones, registró 169 individuos; mientras que la familia Poaceae, con el género *Festuca*, tuvo 100 individuos.

4.2.3. Estrato herbáceo

Este estrato herbáceo estuvo conformado por 63 especies, 54 géneros y 32 familias. Asteraceae fue nuevamente predominante, con 318 individuos de 17 especies. Adiantaceae destacó con 535 individuos de *Adiantum andicola* Kunth, seguido por Poaceae, con 309 individuos de tres especies, entre ellas *Festuca*. Otras familias notables fueron Cucurbitaceae (*Sicyos deppei* L.) y aquellas con menor representatividad como Commelinaceae, Dryopteridaceae, Scrophulariaceae y Liliaceae.

4.2.4. Riqueza de especies

La mayor cantidad de especies se observó en los estratos herbáceo (53.8%) y arbustivo (33.3%), mientras que el estrato arbóreo representó el 12.8%. Por unidad de muestreo, la riqueza varió entre 7 y 28 especies, con un promedio de 15. Las especies herbáceas y arbustivas tendieron a distribuirse de forma equilibrada, salvo en sitios afectados por incendios. (ver Figura 2)

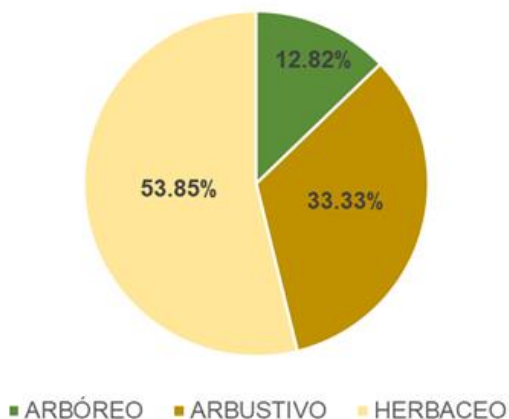


Figura 2. Distribución de las especies por estrato en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo

Fuente: Elaboración propia con resultados obtenidos del muestreo comunitario (2022)

4.2.5. Análisis del componente arbóreo

Riqueza Específica y Abundancia

Se registraron un total de 521 individuos arbóreos con un diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 5 cm. La riqueza específica (S) del componente arbóreo fue de 15 especies, representadas por 10 géneros y 8 familias. Entre las especies más abundantes se destaca *Pinus montezumae* Lamb. con 181 individuos, seguida por *Alnus acuminata* (Kunth) con 66 individuos y otras especies de *Alnus* y *Pinus*. Esto muestra una comunidad arbórea diversa, dominada por especies de coníferas.

Índices de Diversidad Ecológica

Para evaluar la diversidad de la comunidad arbórea, se utilizaron tres índices ecológicos:

Índice de Shannon-Weaver (H'): El valor obtenido fue 2.19, lo que indica una diversidad media a alta en la comunidad arbórea (Shannon & Weaver, 1949). Este índice toma en cuenta tanto la abundancia de cada especie como el número total de especies, sugiriendo que el bosque tiene una buena variedad de especies y una distribución bastante balanceada entre ellas.

Índice de Simpson (D): El valor fue de 0.93, lo que indica una alta diversidad y una distribución relativamente equitativa de las especies (Simpson, 1949). Un valor más cercano a 1 sugiere una alta dominancia por pocas especies, pero en este caso, el valor alto muestra que no hay una especie extremadamente dominante.

Índice de Pielou (J'): Con un valor de 0.81, se indica que la distribución entre las especies es bastante equilibrada (Pielou, 1966). Este índice complementa el de Simpson, al medir la uniformidad en la distribución de individuos entre las especies.

Índice de Margalef (D_{mg}): Finalmente, el índice de Margalef (D_{mg}) fue de 2.23, lo que indica que la comunidad arbórea presenta una rica diversidad en términos de especies por unidad de área. Este índice, propuesto por Margalef (1958), se utiliza para evaluar la riqueza específica de una comunidad en función del número de especies y la abundancia total de individuos. Un valor mayor indica una mayor riqueza específica relativa.

Dominancia y Abundancia Relativa

La abundancia relativa de las especies mostró diferencias marcadas entre los taxones evaluados. *Pinus montezumae* Lamb. registró el mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) con un valor de 114.10, destacándose como la especie dominante en la comunidad forestal. Este resultado refleja su elevada abundancia (34.74 %), frecuencia (34.74 %) y dominancia relativa (44.62 %). Otras especies relevantes por su IVI fueron *Pinus hartwegii* Lindl. (38.62) y *Alnus acuminata* Kunth (34.34), lo que indica que, aunque existe una especie

claramente predominante, también hay una contribución ecológica significativa de otras especies. (ver Cuadro 4).

En contraste, especies como *Quercus sp.*, *Juniperus deppeana Steud.*, y *Cupressus lusitanica Mill.* presentaron IVI bajos (menores a 5), lo cual sugiere que su presencia es más limitada en términos de abundancia, frecuencia y dominancia. Estos resultados evidencian una estructura forestal con un patrón de dominancia marcado, pero con cierta diversidad funcional y ecológica en la composición de especies (Chave et al., 2014).

La presencia de una amplia biodiversidad es un componente clave para la conservación de los ecosistemas forestales, ya que se ha demostrado que la diversidad estructural y vertical del bosque está directamente relacionada con su capacidad de captura de carbono (De Jesús Návar Cháidez et al., 2016; Chave et al., 2014). En este contexto, el índice de diversidad puede influir en la capacidad de un bosque para almacenar carbono; un ecosistema con alta diversidad tiende a tener una mayor cantidad de estratos verticales y una mayor heterogeneidad estructural, lo que facilita la captura y almacenamiento de carbono en diversos compartimentos del bosque (Ali et al., 2016).

Cuadro 4. Índice de valor de Importancia (IVI) en comunidades arbóreas de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo

Especie	Nombre Científico	Abundancia Relativa	Frecuencia Relativa	Dominancia Relativa	Índice de Valor de Importancia
1	<i>Abies religiosa (Kunth) Schtdl. & Cham.</i>	6.91	6.91	7.50	21.32
2	<i>Alnus acuminata (Kunth)</i>	12.67	12.67	9.00	34.34
3	<i>Alnus firmifolia Fernald</i>	4.80	4.80	2.95	12.54
4	<i>Alnus Jorullensis H.B.K.</i>	6.14	6.14	5.45	17.73
5	<i>Arbutus unedo L.</i>	3.26	3.26	0.99	7.51
6	<i>Buddelia parviflora</i>	4.99	4.99	1.15	11.13
7	<i>Cupressus lusitánica Mill.</i>	1.15	1.15	0.58	2.88
8	<i>Juniperus deppeana Steud.</i>	0.58	0.58	0.26	1.41
9	<i>Pinus ayacahuite Ehrenb. ex Schtdl.</i>	1.54	1.54	0.17	3.24
10	<i>Pinus hartwegii Lindl.</i>	9.40	9.40	19.81	38.62
11	<i>Pinus montezumae Lamb.</i>	34.74	34.74	44.62	114.10
12	<i>Pinus patula Schtdl. & Cham.</i>	6.33	6.33	4.52	17.19

Especie	Nombre Científico	Abundancia Relativa	Frecuencia Relativa	Dominancia Relativa	Índice de Valor de Importancia
13	<i>Prunus serotina</i> (Cav.) McVaugh	1.15	1.15	1.04	3.34
14	<i>Quercus</i> sp.	1.34	1.34	0.77	3.46
15	<i>Salix paradoxa</i> Kunth	4.99	4.99	1.20	11.18
Total		100	100	100	300.00

Fuente: Elaboración propia a partir del cálculo del índice de Valor de Importancia Ecológica

Estructura vertical y horizontal del bosque

Las unidades de muestreo fueron agrupadas con base en la similitud en la vegetación y en la localización espacial. Se evaluaron tanto los estratos verticales (inferior, medio y superior) como las clases diamétricas de los árboles (desde <8 cm hasta >50 cm). Las alturas promedio de los árboles variaron entre 12 y 19 m, mientras que los diámetros a la altura del pecho (DAP) oscilaron entre 8 y 97 cm, dependiendo de las unidades de muestreo evaluadas. Las categorías estructurales fueron analizadas en función de los grupos de unidades de muestreo y las comunidades vegetales presentes, que incluyeron bosque de pino, bosque mixto, matorral y pastizal.

La estructura vertical y horizontal del bosque, así como los estratos y clases diamétricas, tienen una relación directa con la capacidad de captura de carbono. Un bosque con mayor estratificación vertical y una distribución heterogénea de tamaños de árboles facilita la captura de carbono, ya que esta diversidad estructural permite una mayor eficiencia en el almacenamiento de carbono en los diversos compartimentos del bosque (biomasa aérea, suelo, raíces). Los bosques más estructurados, con varias capas de vegetación, tienden a almacenar más carbono, debido a su mayor capacidad para capturar luz y almacenar biomasa en distintas alturas y tamaños de árboles, en comparación con los matorrales o pastizales, que suelen tener una menor capacidad de captura de carbono debido a su baja complejidad estructural (Sullivan et al., 2017).

Distribución estructural por grupo de unidades de muestreo

A continuación, se presentan las figuras correspondientes a la estratificación vertical y distribución diamétrica del componente arbóreo, organizadas por grupo de unidades de muestreo según su comunidad vegetal y características estructurales:

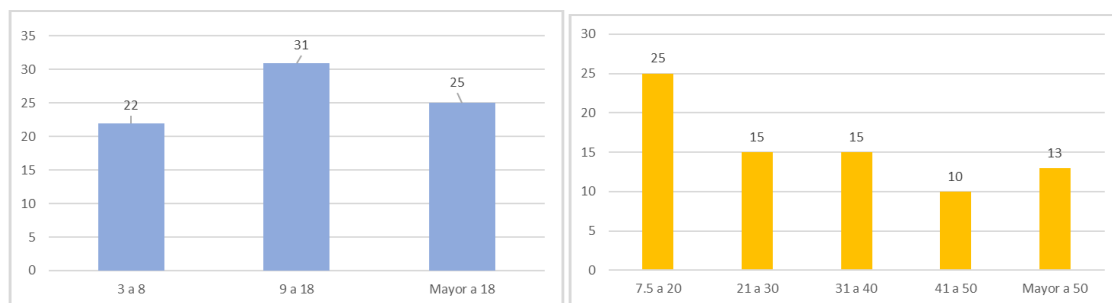


Figura 3. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 1 al 5

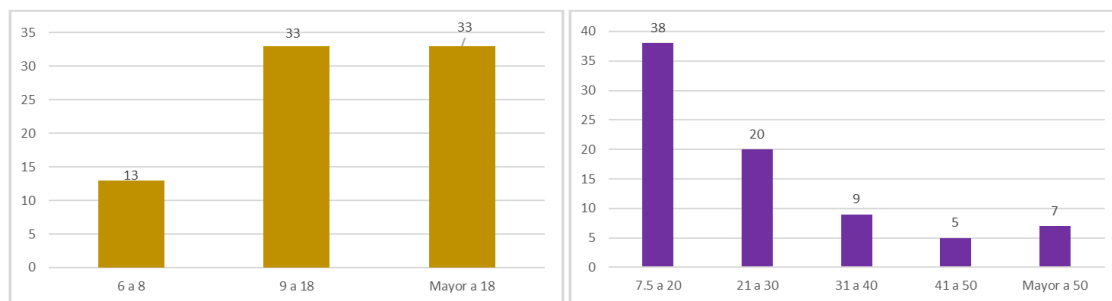


Figura 4. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 6, 7, 9 y 10

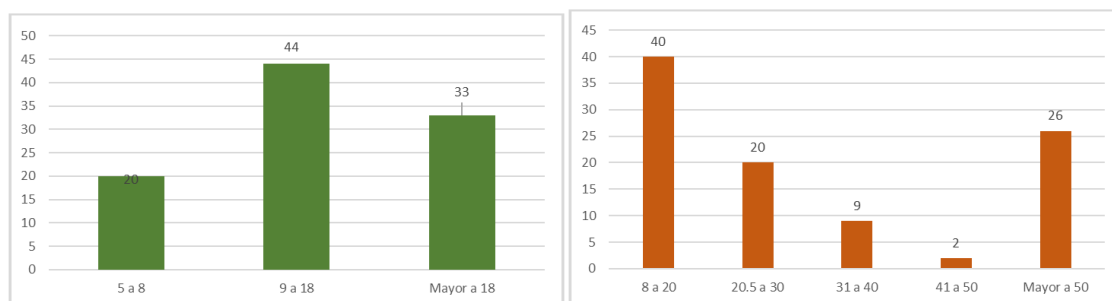


Figura 5. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 11, 12, 13, 14, 15 y 20

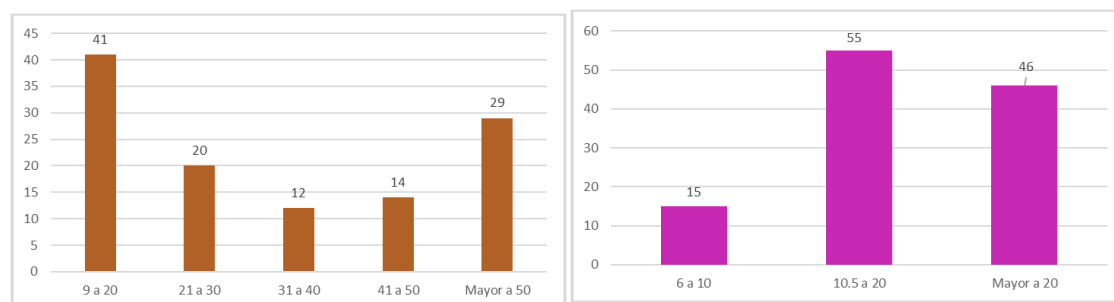


Figura 6. a) Estratificación vertical y b) distribución diamétrica en las unidades de muestreo 16, 21, 22, 26 y 40

Comparación estructural entre grupos

Como parte del análisis integrador del componente arbóreo, se elaboró una comparación entre los cinco grupos de unidades de muestreo previamente definidos. Este análisis permite visualizar las diferencias estructurales entre zonas, en términos de altura promedio y diámetro normal promedio (DAP) de los individuos arbóreos registrados en cada grupo. Esta información es clave para identificar patrones de desarrollo, condiciones de conservación y necesidades de manejo diferenciadas entre comunidades vegetales.

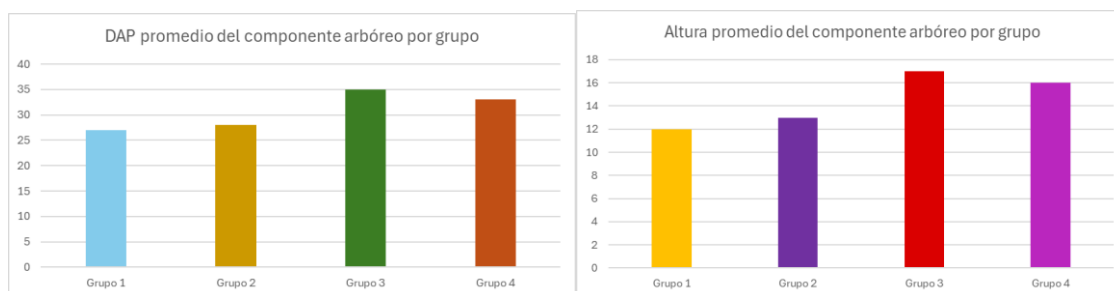


Figura 7. Comparación estructural global por grupo de unidades de muestreo

Caracterización de comunidades vegetales

Se identificaron cuatro comunidades vegetales: bosque de pino (3,197 ha), bosque mixto de encino-pino (1,465 ha), matorral (151 ha) y pastizal (200 ha). La mayor diversidad y cobertura correspondieron al bosque de pino. Cada comunidad se describió en términos de especies dominantes, frecuencia, abundancia y distribución espacial.

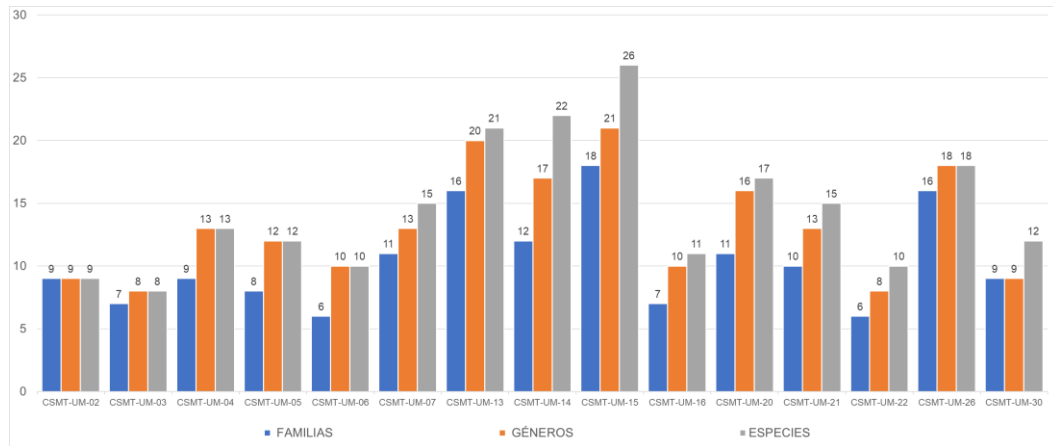


Figura 8. Distribución taxonómica de especies registradas en bosque de pino en la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.

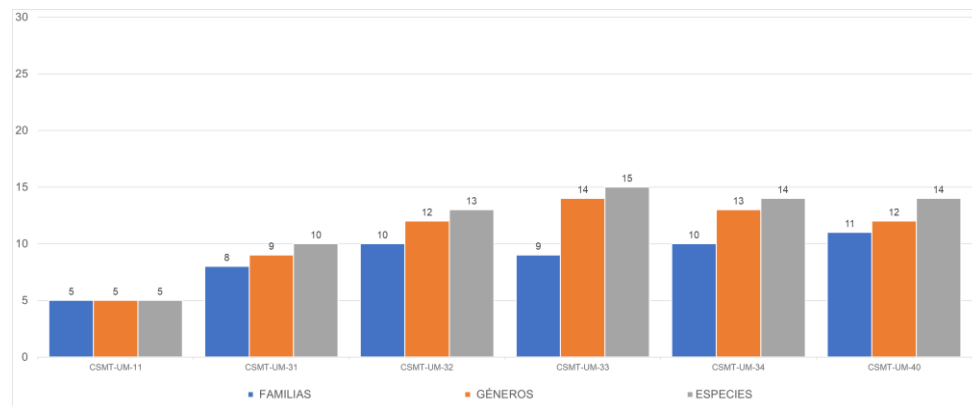


Figura 9. Distribución taxonómica de especies registradas en bosque mixto de pino-encino de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.

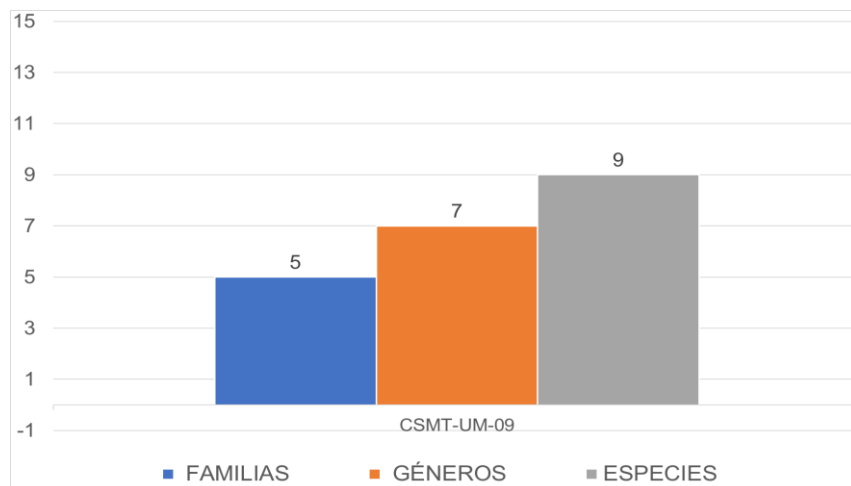


Figura 10. Distribución taxonómica de especies registradas matorral de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.

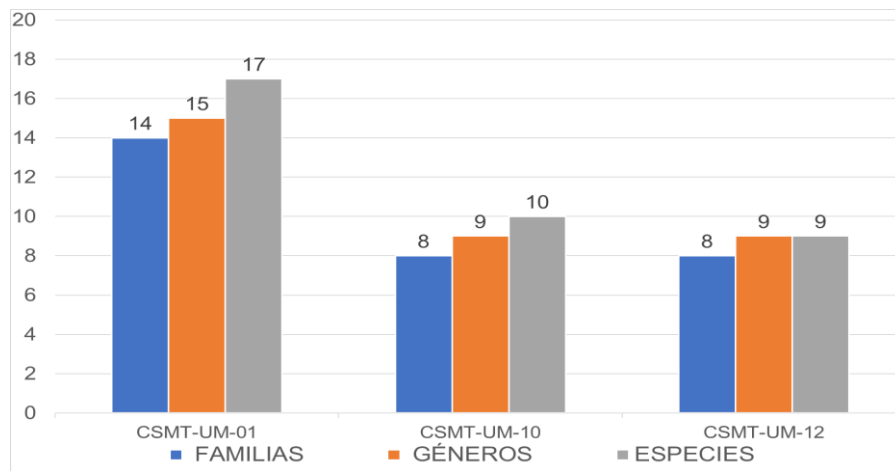


Figura 11. Distribución taxonómica de especies registradas en pastizal de la comunidad de San Miguel Topilejo por unidad de muestreo.

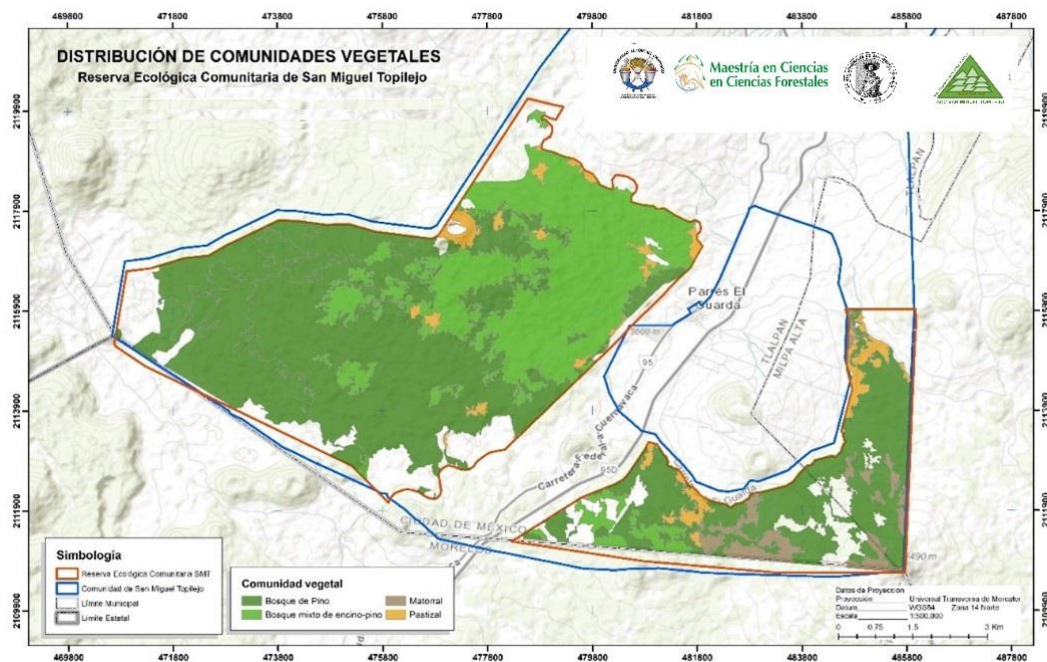


Figura 12. Distribución espacial de las comunidades vegetales identificadas en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo.

4.2.6. Discusión del Objetivo 1

El grupo de muestreo con mayor diversidad florística fue el Grupo 3 (bosque mixto), con un promedio de 18 especies por unidad de muestreo (UM) y un total

de 55 especies diferentes. Este grupo destaca por su alta diversidad, lo que sugiere una estructura ecológica más compleja y saludable. Le siguieron los Grupos 4 y 5, con un promedio de 14 y 13 especies por UM, respectivamente, y un total de 46 y 31 especies, lo que también refleja una diversidad significativa, aunque ligeramente inferior.

Por otro lado, los Grupos 1 y 2, ubicados en zonas más alteradas, mostraron una diversidad más baja, con 31 y 25 especies presentes en los diferentes estratos, respectivamente. Los promedios por unidad de muestreo fueron de 12 y 11 especies distintas, lo que indica una menor heterogeneidad ecológica, posiblemente asociada a actividades humanas o cambios en el uso del suelo que afectan la regeneración natural y la diversidad del ecosistema.

En cuanto a la densidad arbórea, las unidades de muestreo 31 y 32, pertenecientes al Grupo 5, presentaron densidades superiores a 800 árboles/hectárea, lo que sugiere una posible sobrepoblación. Esto podría generar competencia excesiva entre los individuos, lo que afectaría su crecimiento y la salud general del ecosistema. En consecuencia, se podría considerar la implementación de manejo silvícola para reducir la densidad y mejorar las condiciones del bosque.

Por otro lado, las unidades de muestreo con densidades intermedias, que varían entre 325 y 650 árboles/hectárea, incluyen las unidades 11, 12, 13, 14, 15 y 20, todas pertenecientes al Grupo 3. Estas unidades reflejan una estructura arbórea más equilibrada, lo que indica que el ecosistema está menos afectado por perturbaciones extremas. Este tipo de estructura podría estar relacionado con una mejor capacidad de regeneración natural, lo que favorece un entorno más propenso a la conservación de la biodiversidad.

En contraste, las unidades de muestreo 1 a 5, ubicadas en el Grupo 1, presentaron densidades más bajas, entre 150 y 305 árboles/hectárea. Estas bajas densidades pueden estar asociadas a una presión antrópica significativa, como la tala ilegal o el uso no sostenible del suelo, que afectan negativamente la regeneración del bosque y su biodiversidad.

Estos resultados muestran una variabilidad en la diversidad y densidad arbórea de las unidades de muestreo, lo que refleja las diferencias en las condiciones ecológicas y el impacto de las actividades humanas. Las unidades con mayor diversidad florística y densidades intermedias sugieren ecosistemas más saludables y con una mayor capacidad de regeneración natural, lo cual es fundamental para el proceso de captura de carbono. Estos ecosistemas, al mantener una estructura más balanceada y menos afectada por perturbaciones, pueden almacenar carbono de manera más eficiente a través de diversos compartimentos del bosque, como el suelo, la biomasa y los árboles de mayor porte.

Por otro lado, las unidades con altas densidades o bajas diversidades, como las de los grupos más alterados, apuntan a posibles problemas de sobrepoblación o presión antrópica, lo que puede limitar la capacidad de los ecosistemas para capturar y almacenar carbono de manera óptima. La sobrepoblación puede inducir una competencia excesiva entre individuos, afectando el crecimiento y la capacidad de los árboles para almacenar carbono. En este sentido, el manejo adecuado de las áreas más afectadas es crucial para mejorar la estructura ecológica del bosque, lo que a su vez optimiza su función de captura de carbono y contribuye a la mitigación del cambio climático.

4.3. Resultados de los objetivos 2 y 3: Estimación del contenido y captura potencial de carbono aéreo en el bosque de la Reserva ecológica comunitaria de San Miguel Topilejo

4.3.1. Caracterización del componente arbóreo del bosque

La caracterización estructural del componente arbóreo del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo se realizó a partir del análisis de 580 árboles distribuidos en 65 unidades de muestreo permanentes, establecidas mediante un diseño aleatorio estratificado. Esta superficie de muestreo representa una intensidad del 2.6% sobre el área total de estudio (100 hectáreas). En esta área se identificaron seis especies arbóreas pertenecientes a los géneros *Abies*, *Alnus* y *Pinus*, que son representativas de comunidades templadas

montañosas típicas del centro de México. La selección de estas especies refleja las condiciones ecológicas particulares de la región, las cuales están asociadas a los ecosistemas de montaña de clima templado y moderado.

4.3.2. Composición florística y diversidad del arbolado

El estrato arbóreo del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo estuvo compuesto por seis especies principales: *Alnus acuminata* (Kunth), *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus hartwegii* Lindl., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Alnus jorullensis* H.B.K., y *Alnus firmifolia* Fernald. Estas especies sumaron un total de 580 individuos, lo que refleja una riqueza florística moderada, representativa de los patrones de diversidad observados en bosques templados del Eje Neovolcánico Transversal. La predominancia de especies del género *Alnus* es una característica destacada en ecosistemas de montaña, donde estas especies se asocian con suelos ricos en nutrientes y una alta capacidad de regeneración natural.

Para evaluar la heterogeneidad y diversidad del arbolado, se calcularon varios índices de diversidad, cuya importancia no solo radica en su uso ecológico para medir la salud y complejidad del ecosistema, sino también en su relación directa con la capacidad del bosque para capturar carbono. La diversidad biológica en un bosque influye en su capacidad de adaptación y resiliencia ante cambios climáticos, lo que, a su vez, afecta su capacidad para almacenar carbono a largo plazo:

Índice de Shannon (H') = 0.232, lo cual indica una diversidad baja, ya que este índice generalmente varía entre 0 (baja diversidad) y valores mayores a 2 o 3 en comunidades altamente diversas. A pesar de su baja diversidad específica, el bosque presenta cierta estructura ecológica funcional, en la que la competencia y la complementariedad entre especies pueden contribuir a procesos como la captura de carbono. Esta organización permite cierta eficiencia en el uso de recursos y favorece la estabilidad estructural y el almacenamiento de biomasa, aun cuando la dominancia de pocas especies reduce la heterogeneidad florística.

Índice de Simpson ($1 - D$) = 0.731, que sugiere una alta probabilidad de encontrar individuos de especies distintas en un muestreo aleatorio. Este índice, al reflejar la distribución equitativa de las especies, indica que el ecosistema tiene una capacidad balanceada de captura de carbono, evitando que algunas especies dominen el proceso de fijación de carbono, lo que sería menos eficiente.

Índice de Margalef (D_{mg}) = 1.18, que refleja una baja riqueza específica relativa al número de individuos muestreados. A pesar de ser un valor bajo, este índice puede sugerir que, aunque el bosque tiene una diversidad moderada, podría estar mejorando su potencial para capturar carbono si se mejora la heterogeneidad y la presencia de especies con características de mayor fijación de carbono.

Los valores obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas en bosques templados montanos dominados por coníferas y latifoliadas, como los trabajos de Álvarez-Aquino et al. (2012) y Ramírez-García et al. (2021), que destacan la influencia de factores edáficos, altitudinales y de manejo comunitario sobre la diversidad arbórea. Esta diversidad, medida a través de índices ecológicos como el de Shannon, Simpson y Margalef, está estrechamente relacionada con la capacidad del bosque para capturar y almacenar carbono. Ecosistemas con mayor diversidad tienden a mantener un equilibrio más estable entre las especies, lo que les otorga mayor resiliencia frente a perturbaciones. Esta resiliencia no solo favorece la estabilidad ecológica, sino que también optimiza la función de los bosques en términos de captura de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y mejorando los servicios ecosistémicos en el largo plazo.

4.3.3. Estructura y dominancia del arbolado

Desde el punto de vista estructural, las especies más abundantes fueron *Alnus acuminata* (Kunth) (186 individuos) y *Pinus montezumae* Lamb. (153 individuos), seguidas por *Pinus hartwegii* Lindl., *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham., *Alnus jorullensis* H.B.K. y *Alnus firmifolia* Fernald. El diámetro a la altura del pecho (DAP) promedio varió entre 22.2 cm (*A. jorullensis*) y 28.5 cm (*A.*

acuminata), mientras que la altura media osciló entre 11.4 m (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) y 20.4 m (*Alnus acuminata* (Kunth)), evidenciando una estructura vertical heterogénea, típica de ecosistemas en regeneración o con gradientes de sucesión ecológica.

El análisis del IVI, que integra la abundancia relativa, frecuencia y dominancia relativas, mostró que *Pinus montezumae* Lamb. es la especie ecológicamente más significativa del estrato arbóreo, con un IVI de 92.22, seguida por *Alnus acuminata* Kunth (56.13) y *Alnus firmifolia* Fernald (55.48). Estas especies presentan altos valores en al menos dos de los tres componentes del IVI, lo que refleja su papel predominante en la estructura y funcionalidad del ecosistema forestal.

Pinus montezumae Lamb., en particular, combina alta abundancia (27.54 %) y dominancia (43.31 %), lo que evidencia su contribución significativa a la biomasa total y, por tanto, a la captura de carbono. Por su parte, las especies del género *Alnus* aportan funcionalmente como componentes de rápido crecimiento y fijación biológica de nitrógeno, favoreciendo procesos de restauración ecológica y productividad del sistema (Rzedowski, 2006; Pompa-García et al., 2017).

La estructura general del arbolado sugiere un bosque mixto de coníferas y latifoliadas, donde coexisten especies pioneras de ciclo corto como *Alnus* spp., y especies de mayor longevidad y porte como *Pinus montezumae* Lamb y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. Esto puede indicar un posible equilibrio entre captura rápida de carbono, provisión de servicios ecosistémicos y estabilidad estructural a mediano y largo plazo.

4.3.4. Estimación de la biomasa aérea total del arbolado (BAT)

La estimación de la biomasa aérea se realizó a partir de los datos dasométricos obtenidos en campo, utilizando ecuaciones alométricas específicas por especie. El análisis consideró un total de 580 árboles distribuidos en 65 unidades de muestreo permanente, que abarcan un área total de 2.6 hectáreas dentro de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo.

Los valores de biomasa aérea individual (expresados en kilogramos de peso seco por árbol) presentaron una notable variabilidad, con un mínimo de 3.96 kg y un máximo de 3,532.48 kg. La media fue de 696.89 kg, mientras que la mediana fue de 505.77 kg, lo que sugiere una distribución asimétrica con tendencia a valores extremos elevados. La desviación estándar alcanzó los 755.57 kg, y el coeficiente de variación (CV) fue de 1.084, indicando una alta dispersión de los datos con respecto a la media

Cuadro 5. Estadísticos descriptivos de biomasa aérea por árbol (kg)

Estadístico	Valor
N (número de árboles)	580
Media (kg)	696.89
Mediana (kg)	505.77
Mínimo (kg)	3.96
Máximo (kg)	3,532.48
Desviación estándar (kg)	755.57
Coeficiente de variación (CV)	1.084

Fuente: Elaboración propia con base en datos de campo

Este patrón de alta variabilidad es común en comunidades forestales mixtas, donde coexisten especies de crecimiento rápido como *Alnus* spp. con coníferas de mayor longevidad y crecimiento lento como *Pinus* y *Abies*. Las diferencias en edad, tamaño, forma de copa y condiciones microambientales entre árboles individuales también contribuyen a esta dispersión estructural (Chave et al., 2005).

Desde el punto de vista ecológico, estos resultados reflejan un sistema estructuralmente complejo, en el que coexisten árboles de distintos estratos y etapas sucesionales. Esta diversidad estructural influye directamente en la acumulación de biomasa y en la provisión de servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad (Oyarzún, Huber & Oyarzún, 2005).

4.3.5. Determinación del carbono y CO₂ equivalente

Con base en la biomasa aérea total estimada para cada individuo (sección 4.2), se procedió a calcular el contenido de carbono aplicando un factor de conversión de 0.5, según el IPCC (2006). Posteriormente, se estimaron los equivalentes de

dióxido de carbono (CO₂e) multiplicando por 3.67. Los resultados obtenidos por árbol fueron luego agregados por especie y extrapolados a nivel de hectárea

Estos cálculos se realizaron de forma individual para cada uno de los 580 árboles muestreados, permitiendo así generar estimaciones detalladas del almacenamiento de carbono por especie, por árbol, y a nivel de unidad de muestreo.

Los resultados indican que la media de carbono almacenado por árbol fue de aproximadamente 1.28 toneladas, con un rango que va desde las 0.002 hasta las 1.77 toneladas, dependiendo del tamaño del individuo y de la especie. La media de equivalentes de CO₂ por árbol fue de 1,277.82 kg (1.27 toneladas), con un máximo de 6.48 toneladas CO₂e. (Cuadro 6)

Cuadro 6. Estadísticos descriptivos del carbono y CO₂e por árbol

Variable	Mínimo	Media	Mediana	Máximo	Desviación estándar
Carbono por árbol (t)	0.002	0.348	0.253	1.77	0.378
CO ₂ e por árbol (t)	0.007	1.279	0.928	6.48	1.386

Fuente: Elaboración propia con base en datos de campo

En el área de estudio, considerando las 580 observaciones distribuidas en 2.6 hectáreas de muestreo, se estimó un almacenamiento total de 202.10 toneladas de carbono y 741.70 toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) en la biomasa aérea del estrato arbóreo. Este valor representa un promedio de 77.73 toneladas de carbono por hectárea, lo que equivale a 285.27 toneladas de CO₂e por hectárea. (ver Cuadro 7).

Al analizar el almacenamiento de carbono y CO₂e por especie, se observa que algunas especies contribuyen significativamente al total de carbono almacenado. Por ejemplo, *Pinus montezumae* Lamb. es la especie que más carbono almacena, con un total de 98.69 toneladas de carbono y 362.21 toneladas de CO₂e. Otras especies como *Alnus acuminata* (Kunth). y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. también muestran un almacenamiento considerable, con 55.93 toneladas de carbono y 205.28 toneladas de CO₂e, y 12.27 toneladas de carbono

y 45.04 toneladas de CO₂e, respectivamente. Estas contribuciones varían dependiendo de la densidad y tamaño de los individuos de cada especie.

Cuadro 7. Carbono y CO₂e total por especie

Especie	No. de Individuos	BAT (ton)	Co2 Total (ton)	CO2e ton (año 0)
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	69	24.54	12.27	45.04
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth).	186	111.87	55.93	205.28
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	37	11.76	5.88	21.59
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	60	16.25	8.12	29.82
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	75	42.39	21.19	77.78
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	153	197.39	98.69	362.21
Total	580	404.20	202.10	741.70

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos

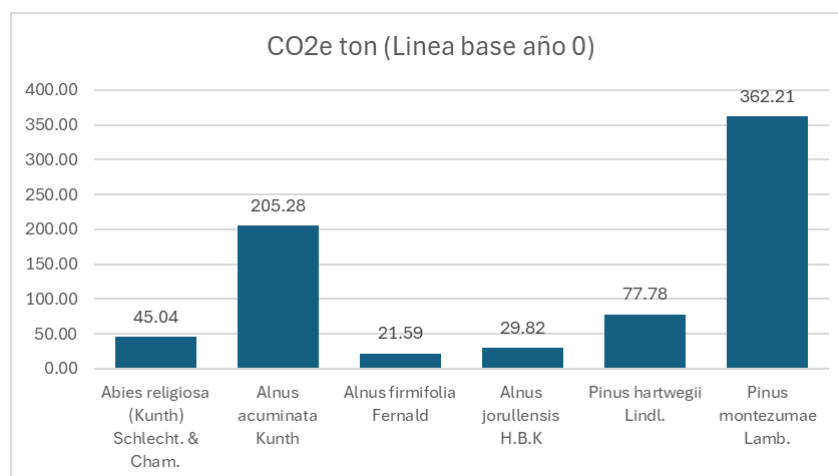


Figura 13. Comparación del CO₂e por especie en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos

Estos resultados reflejan una capacidad moderada de almacenamiento de carbono en comparación con otros estudios realizados en bosques templados montanos de México. Por ejemplo, en un bosque no manejado del estado de Oaxaca se han reportado valores de hasta 164.7 Mg C/ha (equivalentes a aproximadamente 604.4 t CO₂e/ha) (Cruz-García et al., 2021), mientras que en el bosque templado de San Pedro Jacuaro, Michoacán, se han estimado entre 103.1 y 129.1 Mg C/ha (equivalentes a 378.4 a 475.0 t CO₂e/ha) dependiendo del escenario de manejo (Vargas-Larreta et al., 2017).

Aunque el valor estimado en la presente investigación (77.73 t C/ha o 285.27 t CO₂e/ha) se encuentra por debajo del rango superior de estas referencias, es importante considerar que las diferencias pueden estar asociadas a factores como la estructura de edades del bosque, las condiciones edáficas y climáticas locales, así como las metodologías específicas empleadas en cada estudio. Además, cabe destacar que las especies dominantes y su tasa de crecimiento también son factores determinantes. En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación son coherentes con los valores típicos de bosques templados de la región, aunque en el extremo inferior del rango observado.

4.4. Proyección del potencial de captura de carbono

Con el propósito de estimar la acumulación futura de carbono en el arbolado de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, se realizó una proyección de 25 años (2025–2050) considerando el crecimiento esperado en biomasa aérea, y su conversión correspondiente en carbono almacenado y dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Esta estimación se fundamentó en el uso de modelos de regresión no lineal de tipo sigmoidal (modelo logístico), ampliamente empleados en estudios de dinámica forestal por su capacidad para describir trayectorias de crecimiento arbóreo bajo condiciones naturales.

Los modelos fueron ajustados en el software R, empleando rutinas de optimización basadas en mínimos cuadrados no lineales. La calibración se realizó de forma independiente por especie, a partir de bases de datos de crecimiento y morfometría obtenidas durante el muestreo. Las variables dependientes fueron la altura total (m) en función del diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), permitiendo estimar el crecimiento esperable en términos de estructura arbórea.

Calidad del ajuste por especie

Los modelos ajustados presentaron coeficientes de determinación (R^2) satisfactorios, lo cual respalda su uso para realizar proyecciones de biomasa aérea. En el Cuadro 8 se presentan los valores estimados de los parámetros del

modelo sigmoidal por especie, así como el R^2 correspondiente. Estos resultados muestran trayectorias de crecimiento coherentes con la ecología de cada especie: las pioneras (*Alnus* spp.) presentaron curvas de crecimiento acelerado en etapas tempranas, mientras que las coníferas como *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus montezumae* Lamb. y *P. hartwegii* evidenciaron patrones más estables y prolongados.

Cuadro 8. Parámetros del modelo sigmoidal ajustado por especie para proyecciones de crecimiento (altura en función del DAP)

Especie	Asym	xmid	scal	R ² del modelo
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	31.86	19.28	21.33	0.9444
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	23.06	21.22	9.22	0.9335
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	34.22	22.84	13.82	0.8954
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	30.01	33.41	17.31	0.8325
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	30.38	29.75	22.07	0.8303
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	25.36	25.96	12.34	0.7772

Fuente: Elaboración propia. Resultados del ajuste del modelo sigmoidal de tipo logístico (SSlogis) en el software R, utilizando datos dasométricos obtenidos en 65 unidades de muestreo.

Estos valores indican un ajuste robusto y ecológicamente consistente, en especial en especies como *Pinus montezumae* Lamb. y *P. hartwegii*, que mostraron trayectorias de crecimiento bien definidas. En el caso de especies pioneras como *Alnus acuminata* (Kunth) y *A. jorullensis*, el modelo logró captar con precisión la fase de crecimiento acelerado asociada a individuos jóvenes, lo cual resulta clave para estimar su contribución futura a la captura de carbono.

A continuación, se presentan los gráficos que ilustran el ajuste del modelo sigmoidal por especie, donde se muestra la relación entre la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) para cada especie evaluada. Los gráficos permiten visualizar las trayectorias de crecimiento específicas para cada una de las especies y cómo estas se comportan en función del DAP.

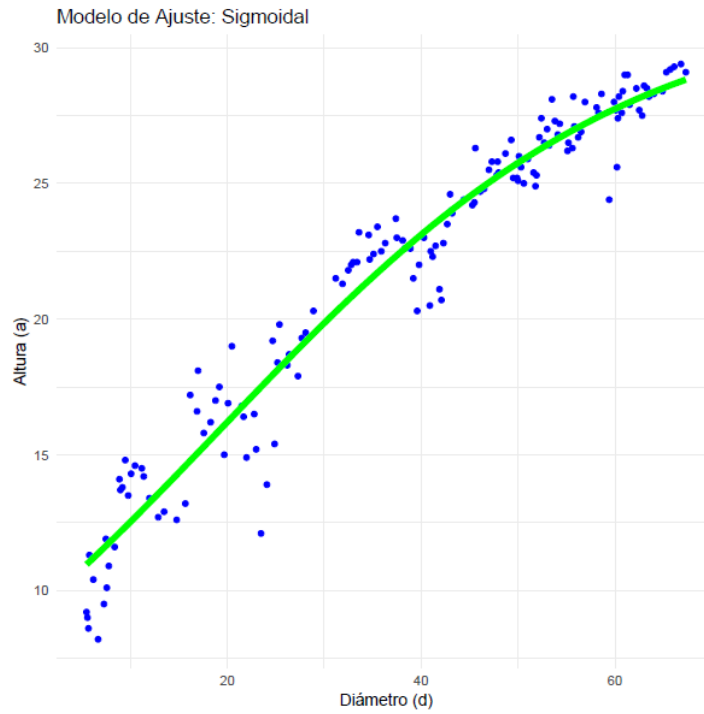


Figura 14. Ajuste del modelo sigmoidal para *Pinus montezumae* (Lamb.)

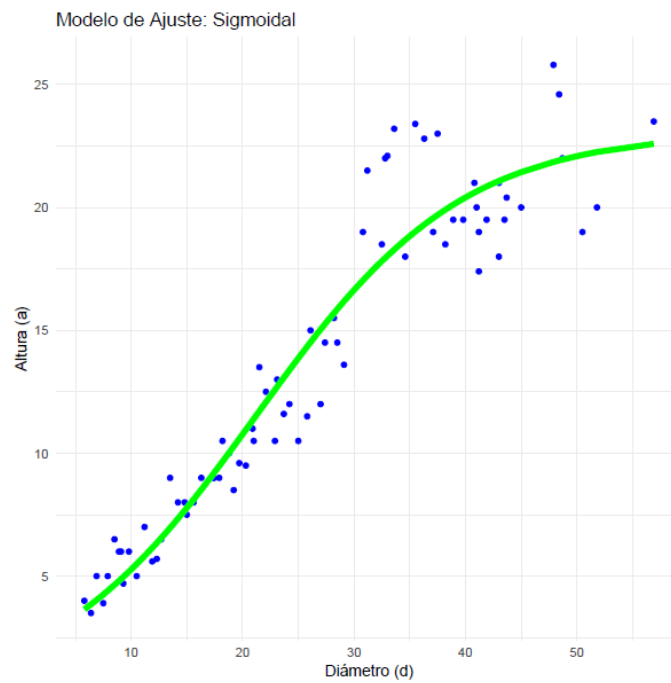


Figura 15. Ajuste del modelo sigmoidal para *Pinus hartwegii* (Lindl.)

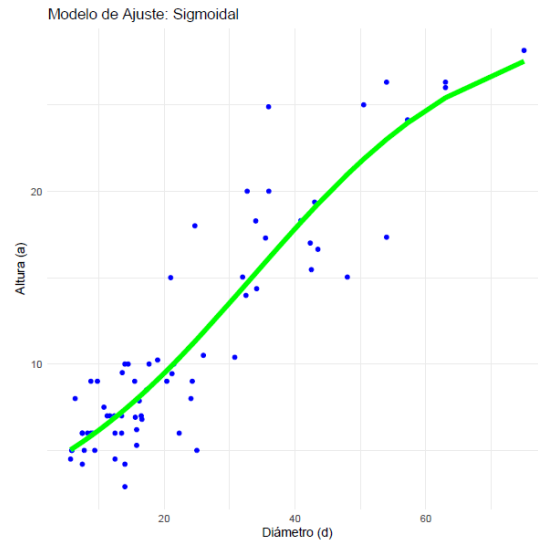


Figura 16. Ajuste del modelo sigmoidal para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., mostrando una relación más estable a medida que el árbol crece.

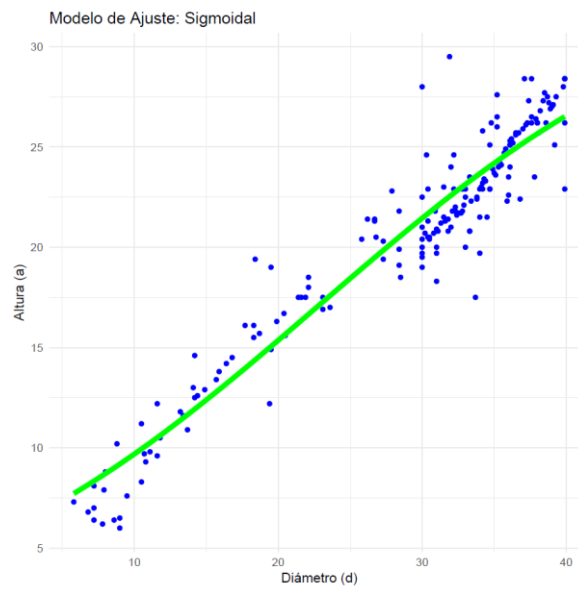


Figura 17. Ajuste del modelo sigmoidal para *Alnus acuminata* (Kunth).

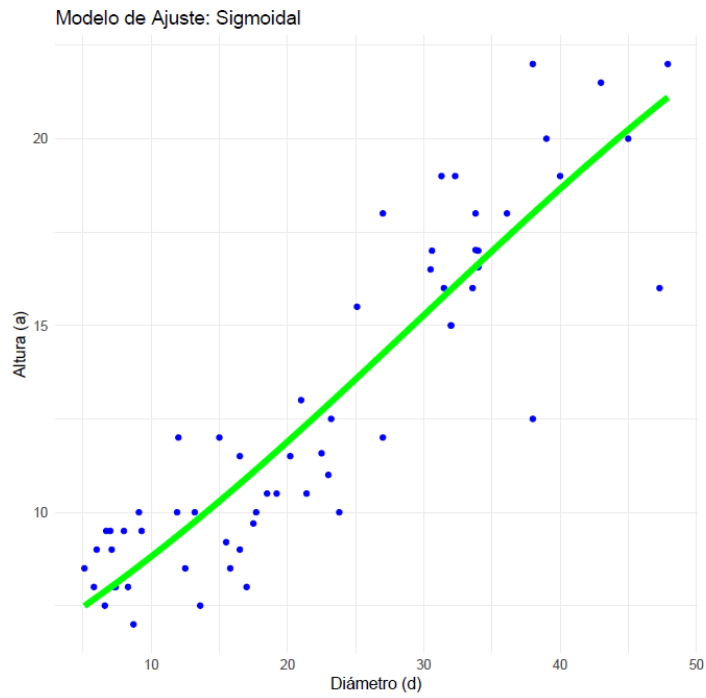


Figura 18. Ajuste del modelo sigmoidal para *Alnus jorullensis* (H.B.K.)

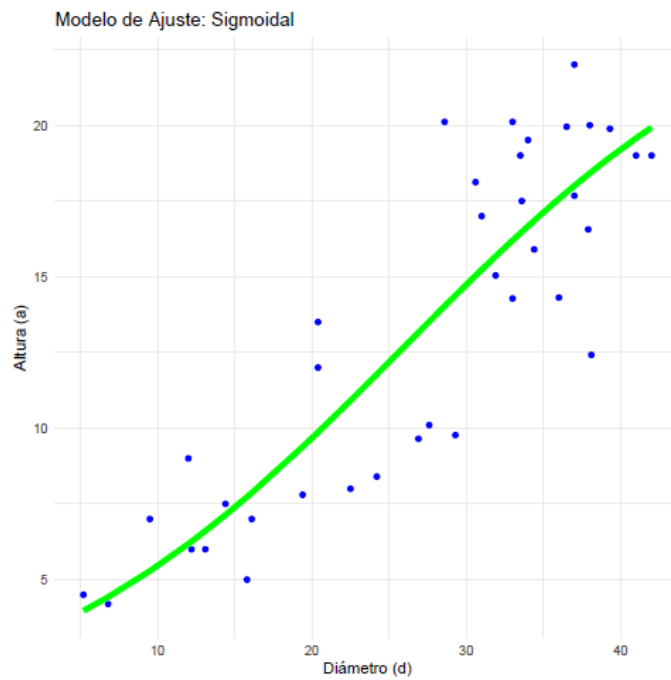


Figura 19. Ajuste del modelo sigmoidal para *Alnus firmifolia* (Fernald)

En conjunto, estos modelos fueron la base para proyectar año con año la biomasa aérea esperada por especie, y posteriormente calcular el contenido de carbono y CO₂e bajo un escenario conservador sin perturbaciones externas.

4.4.1. Acumulación proyectada de CO₂ equivalente al año 2050 bajo escenarios climáticos contrastantes

Con el objetivo de estimar el comportamiento futuro del arbolado en cuanto a su capacidad de captura de carbono, se realizó una proyección de 25 años (2025–2050) considerando dos escenarios climáticos: (1) escenario base o de continuidad climática, y (2) escenario seco caracterizado por estrés hídrico derivado de condiciones prolongadas de baja precipitación. Esta simulación permite explorar el potencial de captura de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) por especie y evaluar la sensibilidad del bosque a variaciones en el clima.

Las proyecciones se construyeron a partir de las curvas de crecimiento ajustadas mediante modelos no lineales tipo sigmoideal para cada especie, tal como se describe en el apartado metodológico. A partir de estos modelos se estimó el incremento anual en biomasa aérea, la acumulación de carbono, y finalmente la conversión a CO₂e.

Escenario base (continuidad climática)

Bajo condiciones climáticas óptimas (es decir, sin alteraciones significativas en la temperatura o precipitación), las especies evaluadas mostraron trayectorias de crecimiento sostenidas en la acumulación de CO₂e. La Figura 20 muestra el comportamiento proyectado para cada una:

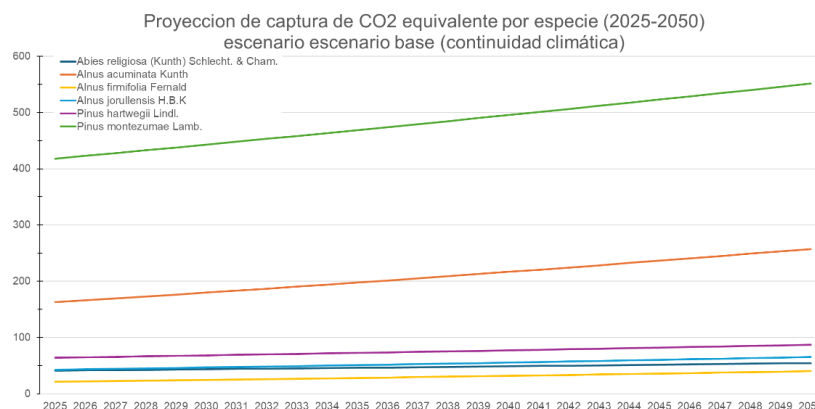


Figura 20. Proyección de captura de CO₂ equivalente por especie (2025–2050) bajo escenario base (continuidad climática).

Curvas de acumulación anual de CO₂e para seis especies arbóreas de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, proyectadas mediante modelos sigmoides. Este escenario asume condiciones climáticas normales, sin alteraciones significativas en precipitación o temperatura

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo (2024) y simulaciones realizadas en R mediante modelos sigmoides por especie.

Las especies que lideran la captura acumulada al año 2050 son *Pinus montezumae* Lamb. y *Alnus acuminata* (Kunth), con poco más de 550 y 250 toneladas de CO₂e respectivamente, seguidas por *Pinus hartwegii* Lindl., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., y *Alnus jorullensis* H.B.K. Este comportamiento se relaciona tanto con su densidad poblacional como con sus patrones de crecimiento rápido o intermedio. La especie *Alnus firmifolia* Fernald muestra una acumulación más discreta, pero con una pendiente de crecimiento constante.

Escenario seco (estrés hídrico)

El segundo escenario simula un contexto climático adverso, caracterizado por una disminución significativa en la disponibilidad de agua, especialmente durante las etapas fenológicas críticas para el crecimiento forestal. Esta condición de estrés hídrico es consistente con proyecciones de cambio climático regional que anticipan un aumento en la frecuencia y duración de eventos de sequía en zonas montañosas del centro de México (CONAFOR, 2018; IPCC, 2021).

Con base en literatura especializada sobre el impacto de condiciones hídricas en la productividad forestal, se definió una reducción del 30 % en la tasa proyectada

de acumulación de biomasa y CO₂e para cada especie. Este valor representa un escenario conservador de estrés hídrico moderado a severo, en el que la disminución en la disponibilidad de agua afecta la eficiencia fotosintética y, por tanto, limita el crecimiento arbóreo sin provocar un colapso funcional del ecosistema. Estudios como el de Chávez-Aguilar et al. (2016) han mostrado que las variaciones climáticas, particularmente la escasez de agua, pueden impactar significativamente la distribución de biomasa aérea en especies templadas como *Pinus patula* Schltdl. & Cham., mientras que investigaciones de Gómez-Díaz et al. (2011) destacan la sensibilidad del almacenamiento de carbono en bosques oaxaqueños ante las condiciones ambientales, lo cual valida la pertinencia de considerar escenarios de estrés hídrico en proyecciones de captura de carbono. Esta aproximación permite evaluar la sensibilidad del sistema forestal a escenarios secos recurrentes y proporciona una base técnica para la formulación de estrategias de adaptación en proyectos de manejo forestal con enfoque de carbono.

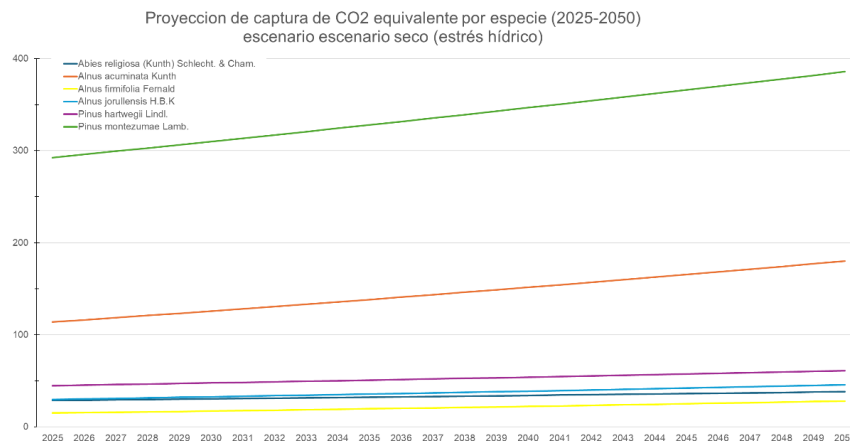


Figura 21. Proyección de captura de CO₂ equivalente por especie (2025–2050) bajo escenario seco (estrés hídrico).

Proyección de captura de CO₂e con una reducción del 30% en la tasa de acumulación, simulando condiciones de sequía prolongada. Se observa una disminución significativa en todos los casos, manteniéndose el patrón relativo de captura por especie.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulaciones en R con base en modelos sigmoides y escenarios contrastantes.

Los resultados indican una afectación generalizada en todas las especies, manteniéndose la misma jerarquía relativa en cuanto al total acumulado, pero con una reducción lineal en la proyección de captura. Esto sugiere que, si bien el bosque conserva su estructura funcional, el estrés hídrico puede limitar severamente su contribución como sumidero de carbono.

Comparación entre escenarios

En el siguiente cuadro se resumen los valores proyectados para el año 2050, comparando directamente ambos escenarios, así como la magnitud de la diferencia absoluta y porcentual.

Cuadro 9. Comparación de captura proyectada de CO₂e al año 2050 entre escenarios climático óptimo y seco.

Especie	CO ₂ e acumulado (óptimo) [t]	CO ₂ e acumulado (seco) [t]	Diferencia absoluta (t)	Reducción porcentual (%)
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	54.57	38.20	16.37	30
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	257.38	180.17	77.21	30
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	40.19	28.13	12.06	30
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	65.18	45.63	19.55	30
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	86.98	60.88	26.1	30
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	551.39	385.97	165.42	30

Fuente: Elaboración propia a partir de simulaciones de captura de CO₂e utilizando modelos sigmoides de crecimiento proyectados por especie para los escenarios climático óptimo y seco (2025–2050).

Comparación de las proyecciones de captura de CO₂e (en toneladas) para seis especies arbóreas bajo condiciones óptimas de crecimiento (escenario base) y bajo un escenario seco con estrés hídrico. Se incluye la diferencia absoluta y la reducción porcentual proyectada en cada caso.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de proyección de CO₂e por especie bajo escenarios óptimo y seco (2025–2050).

Análisis del potencial de captura de CO₂e en términos de densidad por hectárea y acumulación anual (toneladas de CO₂e/ha/año)

Con base en los valores proyectados de acumulación de CO₂e al año 2050, se calculó la densidad de captura por hectárea para cada especie, ajustando los valores acumulados de CO₂e según la superficie de muestreo en la que fue encontrada cada especie. Para ello, se dividió el CO₂e absoluto proyectado para

cada especie entre la superficie de muestreo correspondiente, lo que permitió obtener las unidades en toneladas de CO₂e por hectárea (t CO₂e/ha).

Escenario base (continuidad climática)

En el escenario base, que simula una continuidad climática, los resultados de la simulación proyectan un potencial total de captura de CO₂e de 406.03 t CO₂e/ha en un periodo de 25 años. Este valor refleja la acumulación total de carbono durante un periodo de 25 años, lo que proporciona una estimación clara del nivel de almacenamiento que el bosque podría alcanzar bajo condiciones climáticas estables y sin alteraciones.

A continuación, se presenta la distribución de la captura de carbono por cada especie evaluada en este escenario:

Cuadro 10. Distribución de la captura de CO₂e por especie en el escenario base.

Especie	Unidades de muestreo	Superficie (ha)	CO ₂ e Absoluto (t)	Densidad (t CO ₂ e/ha)
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlecht. & Cham.	35	1.4	54.57	38.98
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	63	2.52	257.38	102.13
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	30	1.2	40.19	33.49
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	39	1.56	65.18	41.78
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	39	1.56	86.98	55.76
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	56	2.24	551.39	246.16
Total	-	2.6	1055.69	406.03

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de datos obtenidos en campo y de la simulación de escenarios de captura de carbono.

Al analizar la captura anual de carbono en este escenario, se estima que la acumulación anual de CO₂e asciende aproximadamente a 16.24 t CO₂e/ha/año. Esto indica que, en promedio, cada hectárea del bosque estudiado sería capaz de almacenar 16.24 toneladas de CO₂e por año durante el periodo proyectado, manteniendo un balance estable de carbono bajo condiciones climáticas sin alteraciones significativas.

En este contexto, bajo el escenario base y considerando el área total de estudio de 100 hectáreas, se proyecta que el bosque podría almacenar un total aproximado de 1,624 toneladas de CO₂e por año. Este ritmo de captura anual refleja una alta eficiencia en la absorción y almacenamiento de CO₂, lo que

resalta el papel clave que desempeña el bosque en la mitigación del cambio climático, dado que la captura de carbono es un proceso continuo que contribuye significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero.

Escenario seco (estrés hídrico)

El análisis del escenario seco, que simula condiciones de estrés hídrico, revela una disminución significativa en la capacidad de captura de carbono del bosque en comparación con el escenario base. En este escenario, la densidad total de captura de CO₂e se estima en 284.22 t CO₂e/ha en el periodo de 25 años, lo que representa una reducción del 30% respecto al escenario de continuidad climática.

Esta disminución en la densidad de captura se traduce en una acumulación anual promedio de aproximadamente 11.36 t CO₂e/ha/año. Este valor indica que, bajo condiciones de estrés hídrico, cada hectárea del bosque estudiado podría almacenar en promedio 11.36 toneladas de CO₂e por año durante el periodo proyectado. Esta reducción en la tasa de captura anual refleja la sensibilidad del ecosistema forestal a las variaciones en la disponibilidad hídrica, lo cual puede afectar negativamente su eficiencia en la absorción y almacenamiento de carbono.

Extrapolando estos resultados al área total de estudio de 100 hectáreas, se proyecta que el bosque podría almacenar un total aproximado de 1,136 toneladas de CO₂e por año bajo el escenario seco. Esta cifra destaca la importancia de considerar las condiciones climáticas al evaluar el potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales, ya que factores como el estrés hídrico pueden limitar significativamente su capacidad de secuestro de carbono.

A continuación, se presenta la distribución de la captura de carbono por especie evaluada en el escenario seco:

Cuadro 11. Distribución de la captura de CO₂e por especie en el escenario seco.

Especie	Unidades de muestreo	Superficie (ha)	CO₂e Absoluto (t)	Densidad (t CO₂e/ha)
<i>Abies religiosa (Kunth) Schlecht. & Cham.</i>	35	1.4	38.20	27.28
<i>Alnus acuminata Kunth</i>	63	2.52	180.17	71.50

Especie	Unidades de muestreo	Superficie (ha)	CO ₂ e Absoluto (t)	Densidad (t CO ₂ e/ha)
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	30	1.2	28.13	23.44
<i>Alnus jorullensis</i> H.B.K.	39	1.56	45.63	29.25
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	39	1.56	60.88	39.03
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	56	2.24	385.97	172.31
Total	-	2.6	738.98	284.22

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de datos obtenidos en campo y de la simulación de escenarios de captura de carbono.

Comparativo entre escenarios

Al comparar la acumulación total de CO₂e entre los dos escenarios, se observa una diferencia significativa. En el escenario base (continuidad climática), el bosque alcanza una acumulación total de 406.03 t CO₂e/ha en 25 años, mientras que en el escenario seco (estrés hídrico), esta cifra se reduce a 284.22 t CO₂e/ha. La diferencia de 121.81 t CO₂e/ha refleja el impacto de las condiciones climáticas sobre el potencial de captura de carbono del ecosistema.

En cuanto a la captura anual, el escenario base proyecta una acumulación promedio de 16.24 t CO₂e/ha/año. En contraste, en el escenario seco, la captura anual promedio se reduce a 11.36 t CO₂e/ha/año, lo que evidencia la disminución en la eficiencia de captura de carbono bajo condiciones de estrés hídrico.

4.4.2. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que el bosque de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo actualmente almacena en promedio 77.73 toneladas de carbono por hectárea (t C/ha), equivalentes a 285.27 toneladas de CO₂ equivalente por hectárea (t CO₂e/ha). Este valor refleja una capacidad intermedia de captura de carbono en la biomasa aérea, y se encuentra dentro del rango esperado para bosques templados montanos con estructura mixta y procesos de restauración activos.

En comparación, Espinoza-Zúñiga et al. (2023) y Cortés-Pérez et al. (2021) documentaron valores de 164.7 Mg C/ha (604.4 t CO₂e/ha) en bosques sin manejo intensivo en la Sierra Norte de Oaxaca. Aunque los valores reportados en Topilejo son menores, deben entenderse dentro del contexto ecológico local,

donde dominan especies pioneras como *Alnus* spp., con menor densidad de madera y edades más jóvenes, lo que se traduce en menor biomasa por individuo.

Asimismo, Regil-García et al. (2020) reportaron hasta 287.5 Mg C/ha ($\approx 1,055$ t CO₂e/ha) en rodales densos de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en el Nevado de Toluca, así como valores entre 65 y 94 Mg C/ha (≈ 240 – 345 t CO₂e/ha) en rodales mixtos de *Alnus jorullensis* H.B.K. y *Pinus hartwegii* Lindl. Estos resultados muestran una buena correspondencia con los datos obtenidos en este estudio para dichas especies, validando la coherencia de las estimaciones realizadas.

Por otro lado, Álvarez-Arteaga et al. (2013) reportaron contenidos de carbono entre 105.9 y 207.3 Mg C/ha (388–760 t CO₂e/ha) en bosques montanos de niebla con una productividad significativamente mayor, influenciada por climas húmedos (hasta 5,800 mm de precipitación anual). En contraste, Topilejo presenta un clima templado subhúmedo y condiciones edáficas distintas, lo que justifica sus menores tasas de acumulación de biomasa.

En cuanto al potencial de carbono calculado dentro de las 100 ha del área de estudio, los resultados de la proyección de captura de carbono en San Miguel Topilejo muestran un potencial notable, especialmente en el escenario de continuidad climática, donde se estima una acumulación de 406.03 t CO₂e/ha para el año 2050, con una captura anual promedio de aproximadamente 16.24 t CO₂e/ha. Este valor se encuentra en el rango superior en comparación con otros estudios realizados en bosques templados y de pino-encino en México.

Por otro lado, el escenario de estrés hídrico simulado revela una reducción del 30% en la capacidad de captura, situándose en 284.22 t CO₂e/ha en 2050 y una captura anual de aproximadamente 11.36 t CO₂e/ha/año.

Este comportamiento es coherente con los hallazgos de (Martínez et al., 2017), quienes demostraron que, en condiciones de sequía prolongada, la captura de carbono en pinos disminuye en un 35% respecto a condiciones óptimas. La

sensibilidad del ecosistema ante la disponibilidad hídrica, por tanto, es un factor crítico por considerar en escenarios futuros de cambio climático.

En este sentido, se puede considerar que la dominancia de especies pioneras de rápido crecimiento (como *Alnus acuminata* (Kunth)) y el manejo comunitario del bosque contribuyen a una dinámica estructural que favorece tanto la regeneración natural como la acumulación progresiva de biomasa. El uso de modelos sigmoides para proyectar la captura de carbono aporta una herramienta robusta para planear a mediano plazo, sobre todo en contextos de cambio climático.

La información generada constituye un insumo estratégico para el diseño de esquemas de pago por servicios ambientales, conservación comunitaria y manejo forestal sustentable en la región.

4.4.3. Conclusiones

El Capítulo 4 presentó los resultados derivados de la aplicación de la metodología propuesta en esta investigación, abordando de forma integral los 3 de los 4 objetivos particulares planteados. En primer lugar, la caracterización ecológica del bosque en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo evidenció una elevada riqueza florística y estructural, con una composición mixta de coníferas y latifoliadas, y con comunidades vegetales diferenciadas espacialmente. La diversidad y estructura observadas son indicativas de un ecosistema con potencial para ofrecer servicios ambientales clave, como la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad.

En segundo término, la estimación del contenido actual de biomasa y carbono aéreo en 100 hectáreas del bosque permitió cuantificar, con base en ecuaciones alométricas específicas por especie y mediciones de campo, un total de 202.10 toneladas de carbono y 741.70 toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e), lo que representa un promedio de 285.27 t CO₂e/ha. Estos valores son coherentes con los reportados en ecosistemas forestales similares y evidencian el papel activo del bosque como sumidero de carbono.

Asimismo, mediante la aplicación de modelos sigmoides de crecimiento proyectado por especie, se estimó el potencial de captura de carbono para los próximos 25 años, bajo escenarios climáticos contrastantes. Los resultados muestran que en las 100 hectáreas del área de estudio, el bosque de Topilejo puede acumular hasta 403 toneladas de CO₂e/ha en un periodo de 25 años con una acumulación promedio de 16.24 t de CO₂e/ha/año bajo condiciones climáticas continuas, aunque dicho valor se reduce en un 30 % bajo condiciones de estrés hídrico. Esta proyección no solo permite visualizar el aporte potencial del ecosistema a la mitigación climática, sino que también aporta insumos para la planificación de estrategias adaptativas frente al cambio climático.

En conjunto, los resultados y productos presentados en este capítulo demuestran la viabilidad técnica, ecológica y social de implementar proyectos de carbono forestal desde un enfoque comunitario, y abren la puerta a futuras líneas de trabajo orientadas al fortalecimiento institucional, la certificación ambiental y la sostenibilidad financiera de los territorios forestales conservados por ejidos y comunidades rurales.

4.5. Literatura citada

- Ali, A., Yan, E., Chen, H. Y. H., Chang, S. X., Zhao, Y., Yang, X., & Xu, M. (2016). Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China. *Biogeosciences*, 13(16), 4627–4635. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4627-2016>
- Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., De Jesús Ordóñez, M., & Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica*, 84, 53–64. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2873783.pdf>
- Bonan, G. B. (2003). *Ecological climatology: Concepts and applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.5860/choice.40-3988>
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. *FAO Forestry Paper* 134. <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm>
- Carpinteyro-Urbán, S. (2014). El potencial natural de la Reserva Ecológica Comunitaria San Miguel Topilejo para su uso turístico. *Agro Productividad*, 7(4), 50–56. https://www.researchgate.net/publication/316492654_El_potencial_natural_de_la_Reserva_Ecologica_Comunitaria_San_Miguel_Topilejo_para_su_uso_turistico
- Chávez-Aguilar, L. A., Návar-Cháidez, J. D., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., & Cantú-Silva, I. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. bajo gestión forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 23–34. <https://doi.org/10.21829/rmcf.2016.2231454>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree

allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>

Chave, J., Condit, R., Muller-Landau, H. C., Thomas, S. C., Ashton, P. S., Bunyavejchewin, S., ... & Hubbell, S. P. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359(1443), 409–420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>

CONAFOR. (2018). Actualización del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático del sector forestal. Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/atlas-nacional-de-vulnerabilidad-ante-el-cambio-climatico-anvcc-80137>

De Jesús Návar Cháidez, J., Barrientos, N. G., De Jesús Graciano Luna, J., Dale, V., & Parresol, B. (2016). Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 10(2), 17–28. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1021272>

Flores-Nieves, V., Acosta-Mireles, M., & Rodríguez-Ortiz, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en el cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 15–28. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/543>

Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2007). Decreto por el que se establece como Área Natural Protegida, con la categoría de Reserva Ecológica Comunitaria, la zona conocida con el nombre de 'San Miguel Topilejo'. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/595/15e/6f9/59515e6f934c1654991881.pdf>

- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., & Corona-Romero, N. (2013). Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques*, 19(1), 53–69. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.1911073>
- González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Camacho-Cruz, A. (2011). Ecología y conservación de los bosques templados de México. En K. MacDicken et al. (Eds.), *Bosques y Cambio Climático* (pp. 35–53). INE-SEMARNAT/CONAFOR.
- Guzmán-Santiago, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., & Marroquín-Morales, P. (2024). Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3934>
- INEGI. (2020). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825197370>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Martínez, H., Gómez, A., & Torres, F. (2017). Impacto del estrés hídrico en la captura de carbono en bosques de pino en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(4), 78–89.
- Návar-Cháidez, J. J. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque

Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681–692.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000300681&script=sci_arttext

Oyarzún, C. E., Huber, A., & Oyarzún, J. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: Producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo*, 21(3), 68–75.
https://www.uvm.edu/~jfarley/UFSC%20AE%20PES/literature/artigos_psa_portugues_espanhol/sa_bosque_producao_agua_valoracao_econ_chile.pdf

Rzedowski, J., & Rzedowski, G. C. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México* (2ª ed.). Instituto de Ecología, A.C.

Rodríguez, E., Espinosa, M., & Vera, A. (2022). Ubicación de la comunidad San Miguel Topilejo en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Ubicacion-de-la-comunidad-San-Miguel-Topilejo-en-el-Suelo-de-Conservacion-del_fig1_320125157

Rodríguez, L. F., Espinosa, M. M., & Vera, A. R. (2022). Características sociales de San Miguel Topilejo. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/dc5791ce-8245-4b97-bdad-c37a5a0db914/200220.pdf>

Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2016). Estimation of the biomass and stored carbon in community forest of La Frailesca region of Chiapas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000500077&lng=es&tlng=en

- Solano, J. R., Moreno, V. S. G., Calderón, O. A. A., & García, S. A. G. (2022). Caracterización estructural y carbono almacenado en un bosque templado frío censado en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1123>
- Sullivan, M. J. P., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Hubau, W., Lopez-Gonzalez, G., Miles, L., Monteagudo-Mendoza, A., Sonké, B., Sunderland, T., ter Steege, H., White, L. J. T., Affum-Baffoe, K., Aiba, S., De Almeida, E. C., ... Zemagho, L. (2017). Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific Reports*, 7(1), Article 39102. <https://doi.org/10.1038/srep39102>
- Universidad Autónoma Metropolitana. (2021). Suelo de conservación de la Ciudad de México: Asuntos ambientales de la metrópoli. Cauce. *Revista de la UAM-Xochimilco*. <https://cauce.xoc.uam.mx/2021/02/13/suelo-de-conservacion-de-la-ciudad-de-mexico-asuntos-ambientales-de-la-metropoli/>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of north-western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Vera Alejandre, R., Martínez Rodríguez, K. F., & Sedeño Díaz, J. E. (2022). Los índices de vegetación NDVI y EVI como herramienta para evaluar acciones de conservación en San Miguel Topilejo. En R. Rosalino (Ed.), *Científicos y sociedad en acción por la biodiversidad y la sustentabilidad del Bosque de Agua de la Megalópolis de México* (p. 221). UAEMex; DAAD. <https://www.researchgate.net/publication/366840793>

- Villers-Ruiz, L., & López-Blanco, J. (2004). Clasificación y caracterización climática de los bosques templados de México: Una propuesta para mejorar su manejo y conservación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 9–21. <https://doi.org/10.17129/botsci.1681>
- Zanne, A. E., et al. (2009). Global Wood Density Database. Dryad. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

5. GUÍA TÉCNICA PARA EJIDOS Y COMUNIDADES: PROYECTOS DE CARBONO FORESTAL BASADOS EN EL PROTOCOLO FORESTAL PARA MÉXICO V3.0

5.1.1. Introducción

El cuarto objetivo particular de esta investigación consistió en desarrollar una Guía Técnica destinada a facilitar la participación de las comunidades y ejidos de México en proyectos de conservación forestal y en los mercados de carbono. Esta guía responde a la creciente necesidad de contar con una herramienta práctica, contextualizada y metodológicamente sólida, que permita a los actores locales implementar proyectos forestales bajo estándares reconocidos de contabilidad de carbono (Bustamante et al., 2015).

El Protocolo Forestal para México v3.0 es un documento robusto, de validación internacional, que establece los lineamientos técnicos y metodológicos necesarios para la certificación de proyectos forestales bajo el sistema de mercado de carbono. Sin embargo, su complejidad y la riqueza de sus detalles hacen que su implementación sea un desafío para las comunidades rurales y los ejidos en México, quienes muchas veces carecen de la formación técnica necesaria para comprender y aplicar estos lineamientos de manera efectiva. La guía que se presenta en este capítulo tiene como objetivo traducir y simplificar los principios y procedimientos establecidos en el Protocolo, transformándolos en una herramienta accesible para su aplicación en el contexto local.

La elaboración de la guía se fundamenta en la premisa de que las comunidades locales deben ser capacitadas y empoderadas para gestionar sus propios recursos naturales, lo cual es clave para la gestión sostenible de los ecosistemas. Según Del Carmen Salgado Hernández y Rivera (2021), la "capacidad comunitaria" es un concepto esencial para entender cómo las comunidades pueden gestionar efectivamente los recursos naturales. La capacitación y empoderamiento de las comunidades, junto con el fortalecimiento de su capital humano y social, son componentes fundamentales para enfrentar los retos de la

gestión ambiental en contextos rurales y asegurar la sostenibilidad de los proyectos a largo plazo.

Además, la participación de las comunidades en la conservación forestal y en los mecanismos de compensación de carbono no solo contribuye a la preservación de los recursos naturales, sino que también les ofrece una fuente de ingreso sostenible a través de la venta de créditos de carbono, generando beneficios económicos y sociales. Esta guía técnica busca servir como una introducción al protocolo, proporcionando un paso a paso detallado y accesible para que las comunidades puedan entender y aplicar las metodologías necesarias para participar en el mercado de carbono de manera efectiva y exitosa.

5.1.2. Metodología de elaboración de la guía

La Guía Técnica fue desarrollada mediante un proceso metodológico participativo y sistemático, que incluyó los siguientes componentes:

Análisis documental del Protocolo Forestal para México v3.0: Se realizó una revisión detallada de los 13 capítulos que conforman el protocolo, con un enfoque particular en los requisitos técnicos y las metodologías de muestreo, cálculo y monitoreo del carbono. Además, se prestó especial atención a los criterios de elegibilidad, las normativas legales y los procedimientos administrativos necesarios para la certificación y comercialización de los créditos de carbono. Este análisis permitió identificar los aspectos más relevantes y complejos del protocolo que necesitaban ser simplificados o adaptados para facilitar su implementación a nivel local.

Adaptación a escala comunitaria: Para asegurar que la guía fuera accesible y aplicable en contextos rurales, los procedimientos técnicos del protocolo fueron reinterpretados y simplificados. Se priorizaron aquellos componentes del protocolo que son viables de implementar con los recursos técnicos y humanos disponibles en las comunidades rurales. Entre los aspectos clave adaptados se incluyeron: Inventarios forestales participativos, que permiten la inclusión activa de la comunidad en el proceso de recolección de datos, Estimación de biomasa

y carbono, utilizando metodologías sencillas y de bajo costo, accesibles para las comunidades, Establecimiento de parcelas permanentes para el monitoreo a largo plazo de los cambios en la biomasa y carbono y Registro fotográfico, como herramienta de monitoreo y verificación visual de los cambios en el entorno forestal.

Incorporación de experiencias locales: Se integraron aprendizajes derivados del trabajo de campo en la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, con el objetivo de contextualizar la guía a las realidades locales y a los retos específicos de las comunidades rurales en México. A través de entrevistas, talleres participativos y la colaboración con organizaciones civiles e instituciones académicas, se recogieron buenas prácticas y experiencias previas de gestión comunitaria en proyectos de conservación forestal y mercados de carbono. Este enfoque también permitió incorporar enfoques que favorecen el empoderamiento comunitario y la sostenibilidad social, asegurando que la guía no solo sea técnica, sino también culturalmente apropiada y adaptable.

Estructuración de contenidos: La guía fue organizada en secciones temáticas que siguen la lógica del ciclo de vida de un proyecto de carbono forestal, desde la selección del sitio y establecimiento de la línea base, hasta el monitoreo, reporte y verificación (MRV). Cada sección contiene objetivos, pasos a seguir, instrumentos requeridos, recomendaciones y ejemplos prácticos.

Este enfoque metodológico permitió construir una herramienta didáctica, con lenguaje claro, apoyos visuales y un enfoque de apropiación comunitaria, que puede ser replicada en otras regiones del país interesadas en acceder a mecanismos de pago por servicios ambientales o mercados de carbono forestal.

5.1.3. Contenido estructural de la Guía Técnica

La Guía Técnica se estructuró en siete secciones principales, siguiendo la lógica operativa de un proyecto de carbono forestal:

- Diagnóstico inicial y contexto comunitario: Presenta lineamientos para identificar el contexto territorial, social y ecológico del sitio, con herramientas como el mapeo participativo, entrevistas comunitarias y revisión documental.
- Diseño del proyecto: Describe los pasos para definir los objetivos del proyecto, delimitar el polígono, establecer la línea base y seleccionar la metodología de cuantificación del carbono, con base en el Protocolo Forestal para México v3.0.
- Inventario y monitoreo forestal (MRV): Incluye instrucciones para establecer parcelas permanentes, realizar mediciones de diámetro y altura, calcular biomasa aérea y carbono, y sistematizar los datos con software de análisis.
- Cálculo del carbono y equivalentes de CO₂: Detalla las fórmulas y factores de conversión para estimar el contenido de carbono y su conversión a dióxido de carbono equivalente (CO₂e), con ejemplos aplicados.
- Verificación, certificación y registros legales: Explica los procesos necesarios para registrar el proyecto, cumplir con las normas aplicables, someterse a verificación externa y obtener la certificación correspondiente.
- Comercialización y beneficios comunitarios: Proporciona una introducción a los mercados de carbono (voluntarios y regulados), estrategias de negociación, canales de comercialización y mecanismos para la distribución justa de beneficios en la comunidad.
- Recomendaciones para la gobernanza comunitaria: Ofrece orientaciones sobre la creación o fortalecimiento de órganos comunitarios de decisión, la transparencia en el uso de los recursos y la integración de mujeres, jóvenes y actores locales clave.

La guía está acompañada de anexos prácticos como formatos para inventario, ejemplos de contratos, esquemas de gobernanza, tablas de densidad de madera y referencias normativas clave, lo cual la convierte en una herramienta integral para iniciar o fortalecer un proyecto de carbono forestal con base comunitaria.

5.1.4. Discusión sobre la utilidad y pertinencia de la guía

La Guía Técnica desarrollada representa una contribución estratégica para facilitar la participación de ejidos y comunidades rurales en esquemas de carbono forestal, en un contexto nacional donde aún existen importantes barreras técnicas, institucionales y de acceso a la información. Su principal valor radica en la traducción operativa de los lineamientos del Protocolo Forestal para México v3.0 en un lenguaje claro, acompañado de ejemplos y recomendaciones aplicables al entorno rural mexicano.

A diferencia de documentos técnicos orientados a especialistas, esta guía adopta un enfoque de apropiación comunitaria, lo que favorece su aplicabilidad en escenarios con limitaciones de capacidad técnica o recursos económicos. Además, su estructura temática, el uso de herramientas prácticas y la integración de experiencias reales aumentan su potencial para ser utilizada como material de capacitación, planeación territorial o elaboración de proyectos en el marco de convocatorias públicas y privadas.

Si bien su implementación puede enfrentar desafíos asociados a la falta de acompañamiento técnico permanente, la guía puede ser vista como un primer paso para democratizar el acceso de comunidades al mercado de carbono, sentando las bases para procesos de gobernanza forestal incluyente y sostenible. Asimismo, su replicabilidad en otras regiones y contextos del país dependerá en gran medida de su actualización periódica, la capacitación continua de actores locales y el fortalecimiento de redes de apoyo institucional.

En este sentido, se recomienda que la guía sea utilizada como un documento vivo, sujeto a mejora continua a partir de su aplicación práctica, retroalimentación comunitaria y evolución normativa en materia de carbono forestal en México.

5.1.5. Conclusiones

El desarrollo de una Guía Técnica para comunidades y ejidos interesados en participar en proyectos de carbono forestal constituye una herramienta clave para la apropiación social del conocimiento generado. Basada en el Protocolo Forestal

para México v3.0, esta guía traduce requerimientos técnicos complejos en procedimientos accesibles y adaptados al contexto comunitario, promoviendo así la equidad en el acceso a los beneficios de los mercados de carbono. Su diseño modular, validación por expertos y enfoque participativo la posicionan como un instrumento replicable y útil para fortalecer la gobernanza forestal a nivel local.

5.2. Literatura citada

- Bustamante, M. M. C., Roitman, I., Aide, T. M., Alencar, A., Anderson, L. O., Aragão, L., Asner, G. P., Barlow, J., Berenguer, E., Chambers, J., Costa, M. H., Fanin, T., Ferreira, L. G., Ferreira, J., Keller, M., Magnusson, W. E., Morales-Barquero, L., Morton, D., Ometto, J. P. H. B., ... Vieira, I. C. G. (2015). Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global Change Biology*, 22(1), 92–109. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>
- Climate Action Reserve (CAR). (2022). Protocolo forestal para México, versión 3.0. Climate Action Reserve. https://climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2022/06/Mexico-Forest-Protocol-V3.0-WG-Draft_ESP.pdf
- Del Carmen Salgado Hernández, M., & Rivera, N. R. (2021). Capacidad comunitaria para el manejo de los recursos naturales en el espacio rural: Una revisión de sus componentes causales. *Sociedad y Ambiente*, 24, 1–31. <https://doi.org/10.31840/sya.vi24.2274>

6. CONCLUSIONES GENERALES

El presente estudio tuvo como objetivo general estimar el contenido y la captura de carbono en los bosques templados de la Reserva Ecológica Comunitaria de San Miguel Topilejo, ubicada en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, a través de un enfoque metodológico mixto que combinó el análisis físico-biológico del sitio, la estimación de biomasa mediante ecuaciones alométricas por especie, la proyección de captura a largo plazo y la elaboración de una guía técnica para comunidades.

A continuación, se presenta el contraste puntual entre los cuatro objetivos particulares planteados y los resultados obtenidos, seguido de una reflexión integral sobre la importancia del trabajo realizado.

6.1. Cumplimiento de los objetivos particulares

Objetivo 1. Identificar las condiciones físicas y biológicas actuales del bosque

Este objetivo fue alcanzado mediante la caracterización de 25 unidades de muestreo de 1,000 m², distribuidas estratégicamente dentro de la reserva. Como resultado, se documentaron 87 especies vasculares pertenecientes a 45 familias, entre las que destacan Asteraceae, Poaceae y Pinaceae. Para entender mejor la estructura del bosque, se aplicaron índices de diversidad como Shannon-Wiener, Simpson, Margalef y Pielou, lo cual permitió evidenciar una importante riqueza y heterogeneidad en los tres estratos vegetales: arbóreo, arbustivo y herbáceo.

El levantamiento florístico y ecológico permitió documentar de forma detallada las condiciones actuales del ecosistema en San Miguel Topilejo. La información generada sobre la diversidad vegetal proporcionó una base sólida para comprender su estado de conservación y su potencial como área de captura de carbono.

Objetivo 2. Estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono en un polígono de 100 hectáreas

Se establecieron 65 parcelas circulares permanentes distribuidas en un área total de 100 hectáreas. Utilizando ecuaciones alométricas específicas por especie (ITES, 2016), se estimó una biomasa aérea total de 404.2 toneladas, correspondiente a 202.1 toneladas de carbono y 741.7 toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e). La biomasa promedio fue de 696.89 kg por árbol sobre una muestra de 580 individuos medidos.

Estos resultados confirman que el bosque templado de la comunidad representa un sumidero de carbono significativo, con una capacidad de almacenamiento destacable incluso en comparación con áreas de conservación federal. La metodología aplicada cumplió con rigurosidad técnica y replicabilidad.

Objetivo 3. Proyectar la captura potencial de carbono en un horizonte de 25 años

Se desarrollaron modelos de crecimiento sigmoides ajustados en R para las principales especies arbóreas (por ejemplo, *Pinus montezumae*, *Abies religiosa*, *Alnus jorullensis*), permitiendo proyectar el incremento diamétrico y de altura durante 25 años. Bajo un escenario climático óptimo, se estimó una captura acumulada de hasta 403 toneladas de CO₂e por hectárea para 2050.

Sin embargo, al modelar un escenario seco con estrés hídrico, la tasa de captura disminuyó en un 30 % promedio, evidenciando la vulnerabilidad del ecosistema frente a condiciones climáticas adversas. Esta dualidad proyectiva reafirma la importancia de diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel comunitario.

Objetivo 4. Desarrollar una Guía Técnica orientada a comunidades interesadas en mercados de carbono

La guía elaborada está estructurada para permitir que ejidos y comunidades puedan evaluar su potencial de captura de carbono y participar en esquemas de pago por servicios ambientales. Basada en el Protocolo Forestal para México v3.0, incluye formatos, listas de verificación, criterios técnicos y recomendaciones para el monitoreo comunitario y la comercialización del carbono.

Este resultado representa un aporte práctico y directo a los actores locales, alineado con los principios de participación social, gobernanza forestal y sostenibilidad territorial. Cumple así con el propósito de convertir el conocimiento técnico en una herramienta accesible para la acción colectiva.

Reflexión final

Los hallazgos de esta tesis dejan claro que los bosques comunitarios como el de San Miguel Topilejo cumplen una función esencial en la captura de carbono, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ambientales. Además, se demuestra que las comunidades tienen la capacidad de involucrarse activamente en el monitoreo y manejo de sus territorios, siempre que cuenten con información accesible, asesoría técnica y herramientas apropiadas.

San Miguel Topilejo es un ejemplo concreto de cómo la conservación puede integrarse con el conocimiento científico, la acción local y la organización comunitaria. La metodología aplicada en este estudio —desde el diagnóstico ecológico hasta las proyecciones de carbono— puede adaptarse a otras regiones del Suelo de Conservación en la Ciudad de México, y también en otros contextos rurales del país.

En resumen, este trabajo no solo permitió medir el carbono de un bosque, sino también demostrar que cuando se combinan ciencia, territorio y comunidad, se pueden generar soluciones reales para enfrentar el cambio climático desde lo local.

7. APÉNDICE A

7.1. Guía Técnica para Ejidos y Comunidades: Proyectos de Carbono Forestal Basados en el Protocolo Forestal para México v3.0



.....Salto de página.....



Guía Técnica para Ejidos y Comunidades: Proyectos de Carbono Forestal Basados en el Protocolo Forestal para México v3.0

FRANCISCO CISNEROS RODRIGUEZ
MAYO 2025



Introducción

La gestión forestal sostenible es esencial en la lucha contra el cambio climático, ya que los bosques actúan como sumideros de carbono, reduciendo los gases de efecto invernadero (FAO, 2020). México, con su vasta biodiversidad, tiene un potencial significativo para participar en el mercado de carbono forestal. Sin embargo, los procedimientos del Protocolo Forestal para México v3.0 pueden ser complejos para los ejidos y las comunidades rurales. Esta guía tiene como objetivo simplificar los principios y procedimientos del protocolo, facilitando la participación de estas comunidades en proyectos de carbono, lo que también genera beneficios económicos y sociales (CAR, 2022).

El mercado de carbono ofrece oportunidades económicas para las comunidades rurales a través de la venta de créditos de carbono, derivados de la conservación y manejo sostenible de los bosques. Los proyectos forestales bien gestionados pueden generar ingresos adicionales para las comunidades, lo que promueve tanto la mitigación del cambio climático como el desarrollo local (Torres y Guevara, 2002). Además, el Protocolo establece principios como la adicionalidad, permanencia y las salvaguardas sociales, los cuales son fundamentales para asegurar que los proyectos no solo sean efectivos en términos ambientales, sino que también beneficien de manera justa a las comunidades involucradas.

Esta guía busca empoderar a las comunidades al proporcionarles los conocimientos necesarios para acceder a los beneficios del mercado de carbono. A través de una explicación clara y accesible de los principios y requisitos del Protocolo Forestal, los ejidos y comunidades podrán desarrollar proyectos forestales sostenibles que contribuyan tanto a la economía local como a la lucha global contra el cambio climático, alineándose con las directrices establecidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este manual pretende ser una herramienta práctica para los participantes interesados en desarrollar proyectos de captura de carbono forestal, promoviendo la conservación de recursos naturales mientras se fomentan ingresos económicos locales.

Objetivo de la Guía

El propósito de esta guía es ofrecer a los ejidos y comunidades rurales de México una herramienta práctica y accesible para participar activamente en proyectos de carbono forestal, alineados con los lineamientos del Protocolo Forestal para México v3.0. Esta iniciativa busca reducir las barreras técnicas y administrativas que enfrentan estos actores, promoviendo su integración en el mercado de carbono mediante una gestión forestal sostenible que genere beneficios ambientales, sociales y económicos.

En un contexto donde los bosques representan un elemento clave en la mitigación del cambio climático, la participación de ejidos y comunidades es crucial, ya que más del 50% de los bosques mexicanos están bajo su administración (INEGI, 2022). Al facilitar la comprensión y aplicación del Protocolo, esta guía ayuda a garantizar que los proyectos forestales cumplan con principios esenciales como la adicionalidad (evitar la duplicación de esfuerzos), la permanencia (asegurar beneficios a largo plazo) y las salvaguardas sociales (proteger los derechos y bienestar de las comunidades) (CONAFOR, 2020).

El objetivo central es fortalecer las capacidades locales para que las comunidades puedan diseñar, implementar y gestionar proyectos que contribuyan a la mitigación del cambio climático y que, al mismo tiempo, ofrezcan ingresos económicos sostenibles. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el mercado de carbono puede ser una herramienta transformadora cuando está bien alineado con las necesidades de los actores locales (CMNUCC, 2021). Esta guía, al priorizar la claridad y adaptarse al contexto comunitario, se convierte en un puente entre los estándares internacionales y las realidades locales, empoderando a las comunidades como actores clave en la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible.

1. Introducción a la guía

1.1. ¿Qué es el carbono forestal y por qué es importante?

El carbono forestal se refiere al carbono almacenado en los árboles, el suelo y la biomasa de los bosques. Este carbono juega un papel crucial en la regulación del clima, ya que los bosques actúan como sumideros naturales al capturar dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera a través de la fotosíntesis.

Importancia:

Mitigación del cambio climático: Los bosques ayudan a reducir la concentración de gases de efecto invernadero.

Conservación de biodiversidad: Al proteger el carbono forestal, se conservan ecosistemas esenciales.

Sostenibilidad económica: Las comunidades que conservan y manejan sus bosques pueden obtener ingresos mediante la venta de créditos de carbono en mercados nacionales e internacionales.

Ejemplo: Un bosque bien manejado puede almacenar toneladas de carbono y, al mismo tiempo, proporcionar beneficios económicos y sociales a las comunidades que lo cuidan.

1.2. Los bosques y su papel en el cambio climático

El cambio climático es causado principalmente por el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). La deforestación y degradación de los bosques liberan grandes cantidades de estos gases, convirtiendo los bosques de sumideros en fuentes de emisiones.

Contribución de los bosques al clima:

- Capturan y almacenan carbono: Absorben grandes cantidades de CO₂ y lo almacenan en sus estructuras.

- Regularan el clima local y global: Proveen sombra, reducen temperaturas y mantienen ciclos hidrológicos.
- Proveen servicios ecosistémicos: Como agua limpia, polinización y protección contra desastres naturales.

Dato clave: Proteger un bosque evita emisiones y promueve la captura continua de carbono.

1.3. ¿Qué es el mercado de carbono y cómo beneficia a los ejidos y comunidades agrarias?

El mercado de carbono es un sistema que permite a las organizaciones compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero invirtiendo en proyectos que capturan carbono, como los de conservación forestal. Un crédito representa la reducción o captura de una tonelada de CO₂

¿Cómo funciona?

1. Los proyectos forestales calculan cuánto carbono pueden capturar o evitar que se emita.
2. Esta cantidad se certifica y se convierte en "créditos de carbono".
3. Las empresas o gobiernos compran estos créditos para compensar sus propias emisiones.

Beneficios para las comunidades:

Ingresos económicos: Los ejidos y comunidades que cuenten con áreas forestales, pueden vender créditos derivados de la captura o reducción de emisiones.

Desarrollo local: Los fondos obtenidos pueden destinarse a proyectos comunitarios, infraestructura, capacitación y mejora de la calidad de vida.

Reconocimiento y apoyo internacional: Participar en el mercado de carbono visibiliza los esfuerzos locales de conservación y manejo forestal sostenible.

Conservación del bosque: Se fomenta el cuidado y manejo sustentable de los recursos forestales.

Ejemplo: Una comunidad que protege su bosque puede generar ingresos anuales mediante la venta de créditos de carbono a una empresa que busca ser más sostenible.

1.4. Objetivo de la guía: Facilitar la participación de ejidos y comunidades en proyectos de carbono

El objetivo de esta guía es:

- Proveer un recurso simplificado basado en el Protocolo Forestal para México v3.0, diseñado específicamente para las necesidades y capacidades de ejidos y comunidades.
- Fomentar la participación en proyectos de carbono forestal mediante:
 - o La comprensión de los conceptos básicos.
 - o La adopción de prácticas de manejo forestal sostenible.
 - o El acceso a mercados de carbono como una estrategia económica y ambiental.

¿Por qué esta guía es importante?

Porque traduce el Protocolo Forestal en un lenguaje claro y accesible, facilitando su uso por personas con experiencia práctica en el manejo de bosques, pero sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.

Esta guía busca empoderar a los ejidatarios y comuneros para que contribuyan al manejo forestal y al combate del cambio climático, obteniendo beneficios tangibles para sus comunidades y el medio ambiente global.

2. Fundamentos del Protocolo Forestal para México v3.0

El Protocolo Forestal para México v3.0 es un conjunto de normas y directrices que establecen los lineamientos técnicos y operativos para el desarrollo de proyectos forestales que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero (GEI), particularmente a través de la captura de carbono. Este protocolo, actualizado para asegurar la transparencia y la efectividad de los proyectos forestales, se basa en los principios de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Acuerdo de París. Está orientado a garantizar que los proyectos sean viables, sostenibles y medibles.

El protocolo es especialmente relevante para las comunidades y ejidos, ya que permite la participación en un mercado de carbono regulado, brindando una oportunidad para generar ingresos derivados de las actividades de conservación y manejo sostenible de los bosques.

En esta sección, exploraremos los componentes fundamentales del protocolo, que incluyen su definición, los principios básicos que guían su implementación, y los criterios de elegibilidad para los proyectos.

2.1. ¿Qué es el Protocolo Forestal para México?

El Protocolo Forestal para México v3.0 es una guía nacional que establece los procedimientos para la implementación y certificación de proyectos forestales de captura de carbono. A través de este protocolo, los proyectos deben cumplir con una serie de requisitos técnicos y ambientales para garantizar que las actividades de reducción de emisiones sean efectivas y medibles.

Este protocolo permite a las comunidades, ejidos y propietarios de tierras rurales participar en el mercado de carbono y recibir compensaciones económicas por la captura de carbono en sus ecosistemas forestales. El enfoque del protocolo es asegurar la transparencia, la integridad ambiental y la viabilidad económica de los proyectos, a la vez que se promueve la inclusión social de las comunidades rurales en la toma de decisiones y en los beneficios generados por la conservación.

El protocolo cubre varias áreas clave, entre las que destacan el monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las emisiones de carbono, y los principios para

garantizar que los proyectos sean adicionales (es decir, que no serían posibles sin el proyecto), y que no causen daño social o ambiental.

¿Por qué es importante?

Este protocolo asegura que los proyectos de carbono forestal en México sean verificables, transparentes y económicamente viables, lo cual es crucial para que las comunidades y ejidos del país puedan participar en mercados de carbono sin riesgos, asegurando además que el beneficio económico generado por la venta de créditos se reinvierta en las comunidades.

2.2. Principios básicos: adicionalidad, permanencia y salvaguardas sociales.

El Protocolo Forestal para México v3.0 se basa en tres principios fundamentales que son esenciales para garantizar que los proyectos forestales sean efectivos en la captura de carbono, justos para las comunidades involucradas, y sostenibles a largo plazo:

Adicionalidad

La adicionalidad es un principio fundamental en el que se basa el mercado de carbono. Este concepto se refiere a la capacidad del proyecto para generar beneficios adicionales que no habrían ocurrido de forma natural sin la intervención del proyecto. Es decir, el carbono capturado o las emisiones reducidas deben ser consecuencia directa de las actividades implementadas en el proyecto, y no de actividades que ya estaban ocurriendo.

Por ejemplo, si una comunidad decide restaurar un bosque que estaba siendo degradado, el proyecto debe demostrar que sin la restauración, la captura de carbono no habría sido posible, o al menos no en la misma magnitud. Esta condición asegura que los créditos de carbono generados sean efectivos en la mitigación del cambio climático.

Permanencia

La permanencia se refiere a la capacidad de un proyecto para garantizar que el carbono capturado o las emisiones evitadas se mantendrán a largo plazo. En otras palabras, un proyecto no solo debe capturar carbono, sino que también debe asegurarse de que el carbono permanezca almacenado y no sea liberado de nuevo a la atmósfera, por ejemplo, a través de un incendio forestal, un cambio en el uso de la tierra o la tala ilegal.

El protocolo establece mecanismos para mitigar los riesgos asociados con la permanencia, como la creación de reservas de carbono, asegurando que las emisiones capturadas sean efectivas y duraderas. Esto es esencial para la validez de los créditos de carbono a largo plazo.

Salvaguardas Sociales

Las salvaguardas sociales buscan proteger los derechos, bienestar y participación de las comunidades involucradas en los proyectos. Es crucial que los proyectos de carbono no tengan impactos negativos en las comunidades, sino que se asegure que participen activamente en la toma de decisiones, y que se respeten sus derechos sobre la tierra y los recursos naturales.

Este principio se refiere a:

La consulta previa y el consentimiento informado de las comunidades afectadas.

La distribución justa de los beneficios generados por el proyecto.

La garantía de que las actividades no afecten negativamente la seguridad alimentaria, los derechos de las mujeres y otros aspectos fundamentales de las comunidades.

2.3. Elegibilidad de los proyectos forestales

La elegibilidad de un proyecto forestal en el marco del Protocolo Forestal para México v3.0 se basa en una serie de criterios técnicos y operativos. Estos criterios aseguran que los proyectos sean apropiados para generar créditos de carbono

válidos y verificables, y que contribuyan efectivamente a la mitigación del cambio climático.

Criterios técnicos:

El proyecto debe tener una base científica sólida para garantizar que la captura de carbono sea medible y verificable.

Los proyectos deben ser geográficamente definidos, con límites claros y específicos sobre las áreas que se gestionan, a fin de asegurar que se puedan rastrear las emisiones de carbono y su reducción o captura.

Criterios operativos:

Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV): Los proyectos deben contar con un sistema de monitoreo robusto que permita cuantificar de manera precisa el carbono capturado o evitado. Esto incluye la medición de biomasa, la utilización de herramientas tecnológicas (como imágenes satelitales), y la verificación independiente por parte de entidades acreditadas.

Plan de gestión forestal: Los proyectos deben tener un plan de manejo adecuado que garantice la conservación y restauración del ecosistema forestal a lo largo del tiempo.

Criterios de participación comunitaria:

Las comunidades deben contar con el consentimiento informado sobre las actividades del proyecto y su impacto, lo que también implica que deben participar activamente en la toma de decisiones y en la gestión de los recursos.

3. Pasos para Participar en Proyectos de Carbono Forestal

3.1. Diagnóstico inicial: ¿Tu comunidad es elegible?

Antes de iniciar un proyecto de carbono forestal, es crucial saber si tu comunidad cumple con las condiciones básicas para participar establecidas por el Protocolo Forestal para México v3.0. Este paso, denominado diagnóstico inicial, asegura que las condiciones ambientales, legales y sociales del proyecto sean adecuadas

para su implementación y éxito. Entre los aspectos más importantes que se deben revisar, destacan:

Propiedad de la tierra: El proyecto debe estar basado en terrenos cuyo uso esté bajo control de la comunidad o ejido, con los títulos de propiedad o derechos de uso documentados.

Capacidad para implementar el proyecto: La comunidad debe contar con la capacidad técnica y organizativa mínima para llevar a cabo actividades de manejo forestal sostenible y monitoreo de carbono.

Compromiso con la permanencia del proyecto: Es necesario que las comunidades estén dispuestas a asumir el compromiso a largo plazo para mantener el proyecto operativo y continuar con las actividades de conservación y manejo.

Este diagnóstico es esencial para asegurar que el proyecto sea viable y que cumpla con los criterios del protocolo para la emisión de créditos de carbono.

3.2. Diseño del proyecto: Definición de metas y actividades

El siguiente paso es el diseño del proyecto, donde la comunidad debe definir los objetivos específicos que desea alcanzar con su participación en el proyecto de carbono forestal. Estos objetivos pueden incluir, por ejemplo, la aumentar la captura de carbono o reducir la deforestación en el área del proyecto.

Este paso también requiere un análisis financiero para determinar costos, fuentes de financiamiento y posibles ingresos por la venta de

El diseño debe incluir actividades específicas tales como:

Reforestación: Plantación de especies forestales en áreas degradadas o deforestadas.

Manejo forestal sostenible: Implementación de prácticas de manejo que aseguren la regeneración natural del bosque y la conservación de la biodiversidad.

Conservación de áreas críticas: Protección de áreas de alto valor ecológico que son clave para la preservación de los ecosistemas y el secuestro de carbono.

Este paso también involucra la realización de un análisis financiero para determinar los costos asociados con la ejecución de las actividades, así como las fuentes de financiamiento y los posibles ingresos derivados de la venta de créditos de carbono (CMNUCC, 2021). El análisis financiero debe ser realista y tener en cuenta las capacidades económicas de la comunidad, para asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

3.3. Registro del proyecto: Documentación requerida

Una vez que el proyecto ha sido diseñado, el siguiente paso formal es su registro ante los organismos pertinentes. Para ello, se deben presentar varios documentos clave que validen la viabilidad y el impacto del proyecto. Entre los documentos requeridos se encuentran:

Título de propiedad del terreno: Este documento debe certificar que la comunidad o ejido tiene control sobre el área en la que se implementará el proyecto.

Acuerdos de Asamblea del ejido o comunidad interesado

Plan de manejo forestal y mapa del área del proyecto: El plan debe detallar las actividades específicas que se realizarán en el área, incluyendo el manejo de recursos naturales, las actividades de reforestación, y el monitoreo del carbono.

Línea base de emisiones, que calcula las emisiones que ocurrirían sin el proyecto (Gold Standard, 2022). Este es un cálculo clave que estima las emisiones de carbono que ocurrirían si no se llevara a cabo el proyecto de conservación o reforestación. Esta línea base se utiliza como referencia para medir el impacto del proyecto y la cantidad de carbono secuestrado.

Este proceso generalmente se realiza ante un estándar internacional, como Verra o Gold Standard, que valida y registra el proyecto.

3.4. Monitoreo, reporte y verificación (MRV): ¿Cómo cumplir con los estándares?

El Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) es un componente central en la implementación de proyectos de carbono forestal, pues asegura la transparencia,

la precisión y la credibilidad de las actividades realizadas, así como de los beneficios ambientales generados. El proceso de MRV incluye los siguientes pasos:

Monitoreo de actividades y carbono almacenado: Se debe realizar un seguimiento continuo de las actividades del proyecto, así como de los cambios en el carbono almacenado en los ecosistemas forestales. Este monitoreo implica la medición periódica de la biomasa y el carbono almacenado, a través de métodos y protocolos estandarizados, como los inventarios forestales y los muestreos de parcelas permanentes.

Reporte transparente de resultados: Los resultados del monitoreo deben ser reportados de manera clara, precisa y accesible. Es fundamental que los informes incluyan no solo los datos sobre las emisiones evitadas y el carbono capturado, sino también las actividades realizadas, el avance en los objetivos del proyecto y cualquier ajuste que se haya tenido que realizar en la implementación.

Auditoría externa de los datos: La verificación es el proceso mediante el cual los resultados del proyecto son revisados por verificadores independientes para asegurar que el carbono que se ha reportado y que se ha almacenado realmente se haya capturado de manera efectiva. Las auditorías son realizadas por entidades acreditadas, que utilizan criterios establecidos en el Protocolo Forestal para México v3.0 para evaluar la precisión de los datos y la validez de las actividades realizadas.

Participación de las comunidades en las auditorías: Las comunidades pueden ser parte activa del proceso de verificación al proporcionar documentación, acceso a las áreas del proyecto y colaborar en la recolección de datos durante las auditorías. Además, pueden trabajar directamente con los verificadores para asegurar que los métodos empleados sean apropiados y que los informes sean comprensibles. Este proceso también sirve para fortalecer la transparencia y confianza entre las comunidades y las partes interesadas externas.

El uso de tecnologías accesibles, como el GPS y el software SIG (Sistema de Información Geográfica), facilita enormemente este proceso para las comunidades rurales, permitiéndoles realizar mediciones precisas y gestionar los datos de manera eficiente. Estas herramientas son de bajo costo y fácil acceso, lo que las convierte en opciones viables para comunidades con recursos limitados (CONAFOR, 2020).

3.5. Comercialización de créditos de carbono

Una vez que los créditos de carbono han sido verificados, pueden ser comercializados en los mercados de carbono. Existen dos tipos principales de mercados:

Mercados voluntarios: Son aquellos en los que las empresas, organizaciones o individuos compran créditos de carbono de manera voluntaria para compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero, sin estar obligados por leyes o regulaciones.

Mercados regulados: Son aquellos en los que las empresas compran créditos de carbono para cumplir con regulaciones gubernamentales o acuerdos internacionales, como los establecidos en el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París.

Esto implica identificar compradores interesados, negociar precios justos y establecer contratos claros. Las comunidades pueden beneficiarse al trabajar con intermediarios confiables que les ayuden a maximizar sus ingresos y cumplir con las regulaciones del mercado (CMNUCC, 2021).

Pasos para la comercialización:

Identificación de compradores: Para comercializar los créditos de carbono, las comunidades deben identificar a los compradores interesados. Esto incluye empresas, organizaciones o incluso gobiernos que buscan compensar sus emisiones de carbono.

Negociación de precios justos: Es fundamental que las comunidades negocien precios justos por sus créditos de carbono. Los precios varían dependiendo de la calidad de los créditos, la oferta y la demanda en los mercados, y la capacidad de las comunidades para demostrar que han cumplido con los estándares de verificación y monitoreo del carbono. Aquí es donde los intermediarios especializados pueden ser de gran ayuda.

Contratos claros: Establecer contratos claros y transparentes es crucial para asegurar que las comunidades reciban la compensación adecuada por sus créditos de carbono. Estos contratos deben especificar el precio, las condiciones de venta, los plazos de pago y las responsabilidades de cada parte involucrada. Es recomendable contar con el apoyo de abogados o asesores que aseguren que los contratos sean justos y claros.

Beneficios de trabajar con intermediarios confiables: Las comunidades pueden beneficiarse al trabajar con intermediarios confiables que tengan experiencia en el mercado de carbono. Estos intermediarios pueden ayudar en el proceso de comercialización, desde la identificación de compradores hasta la negociación de precios y la formalización de contratos. Además, pueden proporcionar asistencia para asegurar que los proyectos cumplan con las normas internacionales y maximicen los ingresos por la venta de créditos de carbono.

En este sentido, los intermediarios también pueden facilitar el acceso a los mercados internacionales, donde los precios de los créditos de carbono pueden ser más altos que en los mercados locales.

Recomendaciones para las comunidades:

- Investigar los diferentes mercados de carbono y sus requisitos.
- Buscar asociaciones con organizaciones o empresas que tengan experiencia en la comercialización de créditos de carbono.
- Asegurarse de que los créditos de carbono sean de alta calidad, cumpliendo con los estándares internacionales de verificación y monitoreo.
- Consultar a expertos legales para garantizar que los contratos sean transparentes y protejan los intereses de la comunidad.

4. Métodos Simples para Medir el Carbono en los Bosques

4.1. Técnicas básicas de medición de biomasa forestal

Las mediciones de carbono suelen basarse en estimaciones de biomasa forestal. Una técnica común es medir el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de los árboles, utilizando fórmulas alométricas para calcular la biomasa y convertirla en contenido de carbono (Brown, 1997).

4.2. Herramientas accesibles para comunidades

Las comunidades pueden usar herramientas simples y económicas, como:

- GPS
- Cinta de diámetro, cinta métrica D o cinta diamétrica
- Cinta Metrica o Longimetro
- Clinómetro
- Cinta de registro o cinta de marcaje
- Brújula
- Tornillo Pressler
- Otras Herramientas Comunes como:
- Pico, Machete, Cuerda compensada, maceta o martillo, etc.



4.3. Ejemplo práctico:

Selección de Unidades de Muestreo

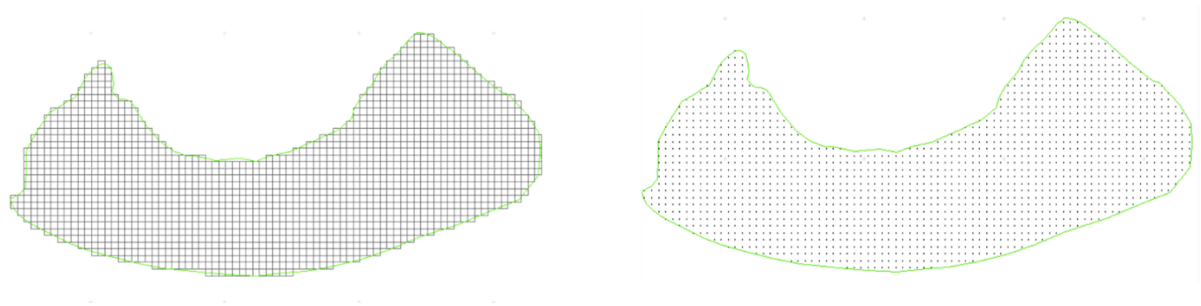
Para realizar el muestreo aleatorio estratificado, como primer momento se generará un análisis espacial para ubicar las comunidades de bosque de pino-encino dentro del área de estudio y generar sitios homogéneos.

Como segundo momento, se generará una malla de puntos de 25 x 25 m para localizar las parcelas que serán establecidas al azar dentro del Área de Actividad.

De todas las parcelas disponibles en el Área de Actividad, algunas son seleccionadas al azar para ser muestreadas utilizando la herramienta de aleatoriedad de CALCBOSK.

Para lograr el estándar de muestreo del estimado de media en un $\pm 20\%$ del promedio calculado con un intervalo de confianza del 90%

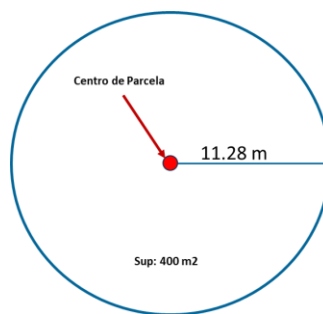
(El número de parcelas será calculado con la herramienta CALCBOSK)



Cómo medir árboles en una parcela

El primer paso consiste en trazar una cuadrícula 25 x 25 m para localizar las parcelas que serán establecidas al azar dentro del Área de Actividad.

Una vez identificado el sitio donde se realizarán las mediciones, se realizará el trazo de la unidad de muestreo la cual estará conformada por un área circular de 400 m², con un radio de 11.28 m.

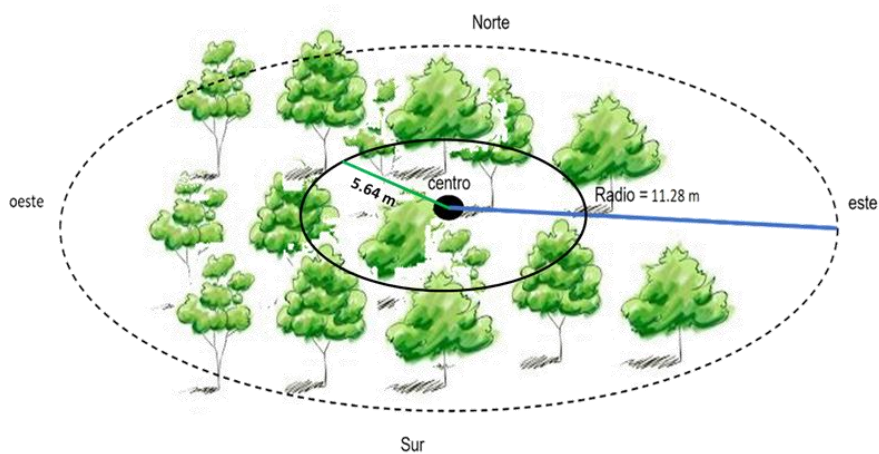


En un radio fijo de 11.28 m (Superficie de 400 m², todos los árboles ≥ 30 cm DAP y ≥ 3 m de altura

En un radio fijo de 5.64 m (Superficie de 100 m²), todos los árboles ≥ 5 cm y < 30 cm de DAP

Se debe medir la Pendiente en %

Estas distancias de la circunferencia se aplican para pendientes menores a 15%



Compensación de Pendiente

Ejemplo: **pendiente de 15%**

Tabla de compensación para las pendientes:

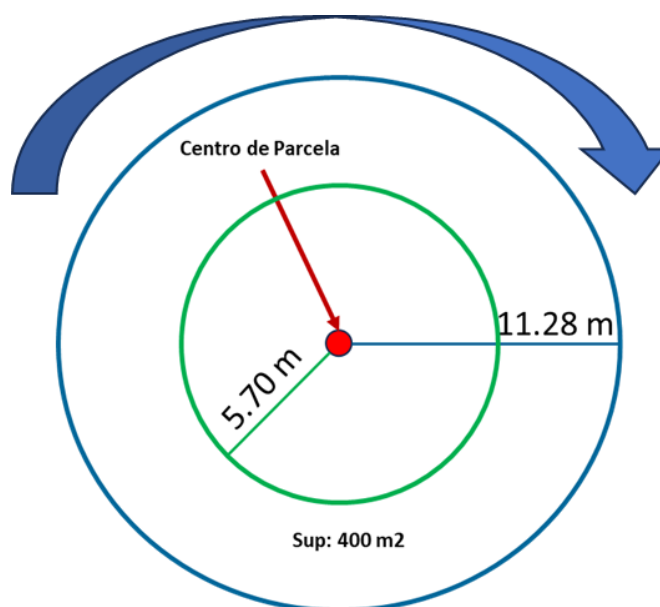
Pendiente	Distancia Horizontal		Pendiente	Distancia Horizontal	
	1/25 ha	1/100 ha		1/25 ha	1/100 ha
%	11.28	5.64	%	11.28	5.64
15	11.41	5.70	70	13.77	6.88
20	11.50	5.75	80	14.45	7.22
25	11.63	5.81	90	15.18	7.59
30	11.78	5.89	100	15.95	7.98
35	11.95	5.98	110	16.77	8.38
40	12.15	6.07	120	17.62	8.81
45	12.37	6.18	130	18.50	9.25
50	12.61	6.31	140	19.41	9.70
60	13.15	6.58	150	20.34	10.17

Una vez realizada la compensación de la pendiente, En un radio fijo de 11.28 m (Superficie de 400 m², todos los árboles ≥ 30 cm DAP y ≥ 3 m de altura

En un radio fijo de 5.64 m (Superficie de 100 m²), todos los

árboles ≥ 5 cm y < 30 cm de DAP

A cada árbol se le asigna un número de 1 a X (para árboles “grandes” de 30 cm y mayores) y una letra de la A a Z (para árboles “pequeños” menores de 30 cm) empezando en 0 grados (Norte) y generalmente continuando el proceso con las manecillas del reloj

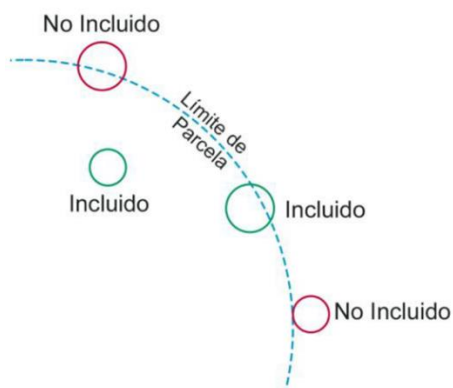


Esta numeración en CALCBOSK facilita la ubicación futura de los árboles y su verificación. A través del tiempo, la numeración se modificará conforme los árboles crezcan en las parcelas y los árboles pequeños que tienen una designación con letras se conviertan en árboles grandes con una designación numérica.

Para árboles “fronteras”: para que un árbol sea incluido, 50% o más de la base estimada del árbol deberá estar dentro de la parcela.

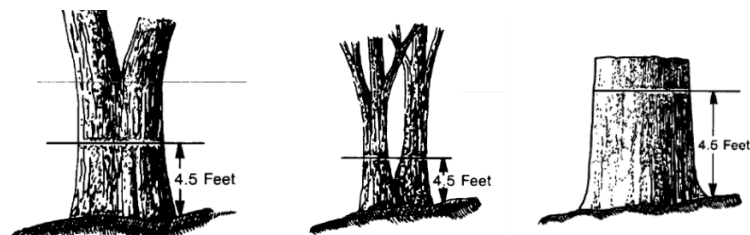
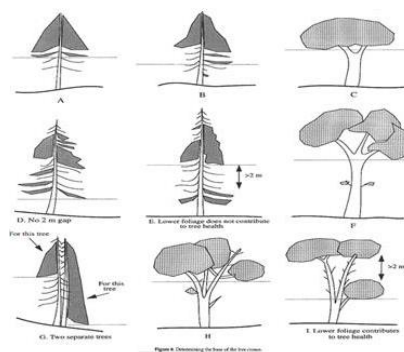
Para definir los límites de la parcela, las medidas radiales se basan en la distancia del centro de la parcela a la base del árbol, éstas deberán corregirse en superficies

Inclinadas a partir del porcentaje de pendiente del centro de la parcela a cada árbol.



Variables dasométricas a medir:

- Datos de la Parcela
- Coordenadas (Lat. y Long.)
- Identificador de parcela (No.)
- Personal que realiza el inventario
- Pendiente del Terreno
- Número de árbol
- Especie
- Diámetro normal
- Altura total de cada individuo
- Altura a la base de la copa del árbol
- Vigor
- Edad de árbol (arboles mayores a 30 cm de diámetro)



Los datos serán capturados en el formato de campo proporcionado por Climate Action Reserve (CAR), dentro del Protocolo Forestal para México Versión 3.0 (ver Anexo 1)

5. Beneficios Sociales, Económicos y Ambientales

5.1. Mejoras en los ingresos comunitarios a través de los créditos de carbono

La venta de créditos de carbono no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también genera ingresos adicionales significativos para las comunidades rurales. Estos ingresos pueden destinarse a diversas iniciativas de desarrollo local que mejoren la calidad de vida de los habitantes, tales como:

Mejoras en infraestructura: Los fondos obtenidos pueden usarse para mejorar caminos rurales, acceso a agua potable, sistemas de alcantarillado, o la construcción de centros comunitarios.

Educación y salud: Las comunidades pueden destinar parte de los ingresos a programas educativos, becas para jóvenes o mejoras en servicios de salud como la construcción de centros de salud o la adquisición de equipos médicos.

Fortalecimiento organizativo: Los ingresos también pueden usarse para fortalecer la capacidad organizativa de los ejidos o las comunidades, permitiéndoles gestionar de manera más eficiente sus recursos naturales y proyectos.

Según estudios recientes, el precio de los créditos de carbono en México varía dependiendo del tipo de proyecto y mercado. En mercados internacionales, el precio promedio de los créditos de carbono ha fluctuado entre \$10 USD y \$11 USD por crédito, especialmente en proyectos de silvicultura y uso de la tierra (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022). Esto representa una fuente de financiamiento adicional para las comunidades, permitiéndoles abordar desafíos económicos, sociales y ambientales, mientras contribuyen a la mitigación del cambio climático.

Importancia del desarrollo local: El hecho de que las comunidades reciban ingresos directos de la venta de créditos de carbono no solo mejora su bienestar, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica de las iniciativas de conservación forestal a largo plazo, promoviendo la gestión sostenible de los recursos naturales.

Ejemplo práctico: En algunas regiones de México, las comunidades han utilizado los ingresos generados por los créditos de carbono para financiar proyectos de reforestación, educación ambiental, y para establecer fondos de emergencia para situaciones climáticas extremas, lo que demuestra el potencial de esta estrategia para contribuir al bienestar y la resiliencia comunitaria.

5.2. Conservación de la biodiversidad y servicios ecosistémicos

Los proyectos de carbono forestal no solo almacenan carbono, sino que también protegen hábitats críticos, mejoran la calidad del agua y reducen la erosión del suelo, lo que beneficia directamente a las comunidades y a la biodiversidad local (CONAFOR, 2020). Estas iniciativas contribuyen significativamente a la conservación de los ecosistemas, ayudando a garantizar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la sostenibilidad a largo plazo.

5.3. Fortalecimiento de las capacidades locales

Al participar en estos proyectos, las comunidades adquieren conocimientos sobre gestión sostenible, tecnologías de monitoreo y comercio de carbono. Esto no solo mejora su resiliencia económica, sino que también empodera a los habitantes para tomar decisiones informadas sobre el uso de sus recursos naturales, fomentando una mayor participación en la toma de decisiones locales (Gold Standard, 2022). La capacitación en el monitoreo y reporte de carbono fortalece la capacidad técnica local, lo que a su vez facilita la implementación de proyectos a largo plazo.

6. Casos de Éxito

6.1 Ejemplo de un ejido que participa en el mercado de carbono

Un caso emblemático es el del Ejido San Pedro El Alto, ubicado en Oaxaca, México. Esta comunidad implementó un proyecto de carbono forestal certificado bajo el estándar Plan Vivo, enfocándose en el manejo sostenible de sus bosques. El proyecto combina actividades como reforestación, conservación de áreas críticas y manejo agroforestal, generando créditos de carbono vendidos en mercados internacionales.

Gracias a este esfuerzo, el ejido logró:

- Capturar más de 100,000 toneladas de CO₂ equivalente.
- Obtener ingresos superiores a \$5,000,000 USD en un periodo de cinco años, utilizados para mejorar infraestructura local y programas educativos (Plan Vivo, 2021).

6.2. Aprendizajes y mejores prácticas

Participación comunitaria: Involucrar a los habitantes desde el diseño hasta la implementación asegura el éxito a largo plazo.

Capacitación constante: Los talleres sobre medición de carbono, monitoreo y comercialización fortalecen las capacidades locales.

Diversificación de actividades: Además de los beneficios del carbono, proyectos complementarios como ecoturismo y agricultura sostenible aumentan la resiliencia económica.

Colaboración con socios estratégicos: Trabajar con ONGs y agencias como la CONAFOR ayuda a cumplir con estándares internacionales y garantizar la viabilidad del proyecto (CONAFOR, 2020).

7. Recursos Adicionales

7.1. Organizaciones y programas de apoyo

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal): Proporciona asistencia técnica y financiera para proyectos forestales.

CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático): Ofrece lineamientos y estándares para el mercado de carbono.

Plan Vivo Foundation: Facilita certificaciones y acceso a mercados internacionales para comunidades forestales.

Gold Standard: Proporciona un marco para la creación de proyectos sostenibles y generación de créditos de alta calidad.

7.2. Glosario de términos clave

Adicionalidad: Concepto que asegura que las reducciones de carbono no habrían ocurrido sin el proyecto.

Biomasa: Es la cantidad de materia viva que hay en un árbol o en un bosque. Incluye troncos, ramas, raíces y hojas. Se usa para estimar cuánto carbono puede almacenar un bosque.

Carbono forestal: Es el carbono que almacenan los árboles y la vegetación. Se mide porque al capturar carbono de la atmósfera ayuda a reducir el cambio climático.

CO₂ (Dióxido de Carbono): Es uno de los gases que causan el cambio climático. Los árboles lo absorben de la atmósfera y lo almacenan en su madera.

Crédito de carbono: Unidad que representa una tonelada de CO₂ capturada o no emitida.

Diámetro a la altura del pecho (DAP): Es una medida común para saber el tamaño de un árbol. Se mide a 1.30 metros del suelo con una cinta especial o una cinta métrica.

Elegibilidad: Se refiere a las condiciones mínimas que debe cumplir una comunidad o su bosque para participar en un proyecto de carbono.

Muestreo forestal: Es el proceso de medir y registrar los árboles en parcelas específicas del bosque para calcular su biomasa y contenido de carbono.

Línea base: Es una estimación de lo que pasaría si no se hiciera el proyecto. Sirve para comparar y saber cuántas emisiones se están evitando gracias al proyecto.

MRV: Siglas de Monitoreo, Reporte y Verificación, esenciales para validar la efectividad del proyecto.

Parcelas de muestreo: Son pequeñas áreas dentro del bosque donde se miden los árboles para representar todo el ecosistema. Hay parcelas grandes y pequeñas dependiendo del tamaño de los árboles.

Permanencia: Es el compromiso de que el carbono capturado se mantenga almacenado en el bosque por mucho tiempo, sin que se libere nuevamente por incendios, tala o degradación.

Plan de manejo forestal: Es un documento que explica qué acciones se harán en el bosque, como reforestar, cuidar, conservar o aprovechar de forma sostenible.

Protocolo Forestal para México v3.0: Es el conjunto de reglas y procedimientos que se deben seguir para crear un proyecto de carbono forestal en México. Establece cómo medir, verificar, registrar y reportar.

REDD+: Estrategia internacional para reducir emisiones derivadas de la deforestación y degradación forestal.

Salvaguardas sociales: Son las normas que aseguran que los derechos, la participación y el bienestar de las comunidades sean respetados durante el desarrollo del proyecto.

Verificación: Es la revisión independiente que hacen expertos externos para confirmar que los resultados del proyecto son reales, medibles y cumplen con las reglas.

8. Literatura Consultada

Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO Forestry Paper. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e.pdf>

Bustamante, M. M. C., Roitman, I., Aide, T. M., Alencar, A., Anderson, L. O., Aragão, L., Asner, G. P., Barlow, J., Berenguer, E., Chambers, J., Costa, M. H., Fanin, T., Ferreira, L. G., Ferreira, J., Keller, M., Magnusson, W. E., Morales-Barquero, L., Morton, D., Ometto, J. P. H. B., ... Vieira, I. C. G. (2015). Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global Change Biology*, 22(1), 92-109. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2021). Mercados de carbono y desarrollo sostenible. <https://unfccc.int/>

Del Carmen Salgado Hernández, M., & Rivera, N. R. (2021). Capacidad comunitaria para el manejo de los recursos naturales en el espacio rural: una revisión de sus componentes causales. *Sociedad y Ambiente*, 24, 1-31. <https://doi.org/10.31840/sya.vi24.2274>

FAO (2020). Los Bosques y el Cambio Climático “Trabajando con los países para hacer frente al cambio climático por medio de la gestión forestal sostenible. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de <https://www.fao.org/3/a-i2906s.pdf>

Gold Standard. (2022). Guidelines for carbon projects. The Gold Standard Foundation. <https://www.goldstandard.org/>

- Climate Action Reserve (CAR). (2022). Protocolo forestal para México, versión 3.0. Climate Action Reserve. Recuperado de https://climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2022/06/Mexico-Forest-Protocol-V3.0-WG-Draft_ESP.pdf
- Plan Vivo Foundation. (2021). San Pedro El Alto case study. Plan Vivo Foundation. <https://www.planvivo.org/>
- Sánchez, J. y Medina, A. (2022). El Potencial del Mercado de Carbono para las Comunidades Forestales de México. *Revista Mexicana de Recursos Naturales*.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). El sector agropecuario en el mercado voluntario de carbono en México [PDF]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/958695/Reporte_MVC_sector_agropecuario_.pdf
- Torres Rojo, J. M., & Guevara Sanginés, A. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, (63), 40-59.

ANEXO 1: LISTA DE VERIFICACIÓN DE ELEGIBILIDAD DEL PROYECTO

Este listado de verificación está diseñado para que ejidos y comunidades evalúen si cumplen con las condiciones básicas para desarrollar un proyecto de carbono forestal, de acuerdo con el Protocolo Forestal para México v3.0. Responde con 'Sí', 'No' o 'Parcialmente' según la situación actual de tu comunidad.

Criterio	¿Cumple? (Sí / No / Parcialmente)	Observaciones
La comunidad tiene propiedad legal del terreno forestal (ejido, comunidad agraria o escritura reconocida).		
Existe interés comunitario y disposición para participar en un proyecto de carbono.		
Se ha realizado al menos un recorrido de campo o diagnóstico básico del bosque.		
Hay cobertura forestal suficiente para conservar, restaurar o manejar.		
Se pueden identificar zonas del bosque con riesgo de degradación o deforestación.		
Se tiene o se puede conseguir apoyo técnico (ONG, universidad, asesoría).		
La comunidad está dispuesta a medir árboles y llevar un registro del bosque.		

Existe un órgano de representación o comité con interés en liderar el proyecto.		
Se pueden elaborar mapas básicos del área forestal (con ayuda técnica o comunitaria).		
La comunidad entiende que los beneficios pueden tardar y que requieren compromiso a largo plazo.		

ANEXO 2: FORMATO DE DIAGNÓSTICO COMUNITARIO INICIAL

Este formato permite recopilar información básica sobre la situación del bosque y la organización comunitaria. Puede utilizarse como herramienta para facilitar el análisis participativo y la toma de decisiones sobre la viabilidad de un proyecto de carbono forestal.

1. Datos Generales de la Comunidad

Nombre de la comunidad o ejido	
Municipio y estado	
Persona(s) responsable(s) del diagnóstico	
Fecha de elaboración	

2. Información sobre Tenencia de la Tierra

Tipo de tenencia (ejido, comunidad, propiedad privada)	
¿Cuentan con documentación legal? (sí/no) ¿Cuál?	
¿Existen conflictos por la tenencia o límites del terreno?	

3. Descripción del Área Forestal

Superficie aproximada del bosque (ha)	
Tipo de vegetación predominante	
Estado actual del bosque (conservado, degradado, mixto)	

Principales especies arbóreas	
-------------------------------	--

4. Uso Actual del Bosque

Actividades que se realizan en el bosque (leña, pastoreo, maderable, otros)	
¿Existen áreas protegidas o zonas de conservación?	
¿Qué tan importante es el bosque para la comunidad?	

5. Amenazas o Riesgos

¿Qué riesgos enfrenta el bosque? (incendios, tala, plagas, etc.)	
¿Qué medidas de protección existen actualmente?	

6. Organización Comunitaria y Actores Clave

¿Existe un comité o grupo que maneje los recursos naturales?	
Actores clave que podrían participar en el proyecto	
Apoyos técnicos o aliados disponibles (ONGs, instituciones, asesores, etc.)	

7. Interés Comunitario

¿Existe interés por participar en un proyecto de carbono forestal?	
¿Qué beneficios espera la comunidad de este tipo de proyecto?	
¿Qué compromisos estaría dispuesta a asumir?	

ANEXO 3: RUTA CRITICA PARA EL DESARROLLO DE UN PROYECTO FORESTAL

Esta ruta crítica presenta las principales etapas que una comunidad debe seguir para desarrollar un proyecto de carbono forestal, desde el diagnóstico inicial hasta la venta de créditos de carbono. Puede ser adaptada según los tiempos y capacidades de cada comunidad.

Etapa	Actividades principales	Responsables	Tiempo estimado
1. Diagnóstico inicial	Revisión de elegibilidad, recorrido de campo, entrevistas comunitarias, estimación preliminar de carbono.	Comité comunitario, técnicos aliados	1 a 2 meses
2. Diseño del proyecto	Definir objetivos, actividades, zonas de intervención, plan de manejo y línea base.	Comité + asesores técnicos	1 a 3 meses
3. Asamblea y acuerdos	Consulta comunitaria, firma de actas, acuerdos sobre beneficios y compromisos.	Comunidad en asamblea	1 mes
4. Registro del proyecto	Preparación de documentación legal, mapas, validación por estándar (Verra, Gold Standard, etc.).	Técnicos + comunidad	2 a 4 meses
5. Implementación	Actividades en campo: conservación, reforestación, patrullaje, registro de acciones.	Brigadas, comunidad	Continuo (mínimo 1 año)

6. Monitoreo y reporte (MRV)	Medición de árboles, captura de datos, elaboración de informes técnicos.	Comité + apoyo técnico	Cada 1 a 2 años
7. Verificación externa	Visita de verificadores, validación de datos, aprobación para generar créditos.	Entidad verificadora externa	1 a 2 meses
8. Venta de créditos	Contacto con compradores, negociación de precios, firma de contratos, distribución de beneficios.	Representantes comunitarios + aliados	1 a 3 meses

ANEXA 4: FORMATO DE ACTA DE ASAMBLEA PARA PROYECTO DE CARBONO FORESTAL

Este formato de acta de asamblea sirve para dejar constancia de la decisión colectiva de participar en un proyecto de carbono forestal. Debe ser llenado y firmado durante una reunión formal de la comunidad o ejido, con la participación de sus autoridades y representantes.

Lugar: _____

Fecha: _____

Hora de inicio: _____

Hora de término: _____

En la comunidad de _____, del municipio de _____, siendo las _____ horas del día ____ de _____ de _____, se reunieron en asamblea general los integrantes del núcleo agrario _____ con el fin de tratar el tema relacionado con la participación en un proyecto de carbono forestal.

Después de analizar y discutir los objetivos, beneficios, compromisos y condiciones del proyecto, se acordó de manera libre, informada y colectiva que la comunidad PARTICIPARÁ en el desarrollo de dicho proyecto, alineado con el Protocolo Forestal para México v3.0.

Asimismo, se autoriza a los siguientes representantes comunitarios para dar seguimiento, coordinar y firmar los documentos necesarios en nombre de la comunidad:

Nombre completo	Cargo en la comunidad	Firma

Observaciones adicionales (si las hay):

Firmas de asistencia de los presentes:

Nombre completo	Firma	Cargo (si aplica)

ANEXO 5: FORMATO DE CAMPO PARA LLENADO DE DATOS ALOMÉTRICOS

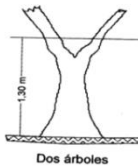
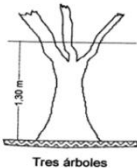
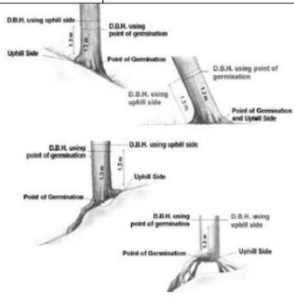
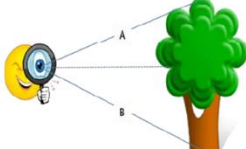
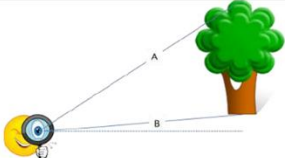
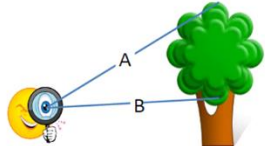
1	Número del Punto de Muestreo	Poner el número de puntos correspondiente a la malla			
2	Iniciales de los Técnicos	5	Fecha día/mes/año	día del levantamiento	
3	Líder del Grupo	Iniciales del líder del grupo	6	Pendiente %	Usando el clinómetro, tomar el promedio del porcentaje de la pendiente
4	Técnico #1	Iniciales de cada técnico	7	Aspecto	Mirando a un objetivo perpendicular a la pendiente con una brújula, ponga las gradas en azimut.
	Técnico #2		8	Latitud	Con el GPS, anotar la latitud
	Técnico #3		9	Longitud	Con el GPS, anotar la longitud
	Técnico #4				
Poner una barrilla de aproximadamente medio metro en el centro del punto de muestreo. Pintar la barrilla para que pueda ser localizada en el futuro.					

Arboles grandes (DNP ≥ 30cm): Por un área fija de 1/25 hectárea (radio) = 11.28 metros (horizontal*).

10	11	12	13	14	15	16		17	18		
Número del Árbol	Especie	Diámetro (cm)	Altura Total (m)	Longitud de la Copa	Vigor 1: Muy sano 2: Sano 3: Suprimido 4: Muerto con algo de deterioro 5: Muerto con deterioro avanzado	Referencia al Centro		Incremento en los últimos 5 años (mm)	Defecto en el árbol 0% = no defecto 100% = todo defecto		
						A	B		Superior	Media	Baja
						Grados azimut del árbol al centro	Distancia del centro del árbol al centro				
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											

Arboles chicos (5 ≤ DNP < 30cm): Por un área fija de 1/100 hectárea (radio) = 5.64 metros (horizontal*).

19	20	21	22	23	24	25		26	27		
Número del Árbol	Especie	Diámetro (cm)	Altura Total (m)	Longitud de la Copa	Vigor 1: Muy sano 2: Sano 3: Suprimido 4: Muerto con algo de deterioro 5: Muerto con deterioro avanzado	Referencia al Centro		Incremento de los últimos 5 años (mm)	Defecto en el árbol 0% = no defecto 100% = todo defecto		
						A	B		Superior	Media	Baja
						Grados azimut del árbol al centro	Distancia del centro del árbol al centro				
A											
B											
C											
D											
E											
F											
G											
H											
I											
J											
K											
L											
M											

10/19	Número del Árbol	Empezando a 0 grados (Norte) en dirección a las manecillas del reloj, marcar el número en los árboles de más de 5 cm de diámetro y con una letra cada árbol menor de 5 cm de diámetro en la cara del árbol que se pueda ver desde el centro del punto de muestreo. Los números y letras en los árboles deben corresponder con los datos en el formato.																				
11/20	Especie	Determinar la especie de cada árbol. Apuntar su abreviatura en el formato. Por favor de chequear la lista de especies en CALCBOSK por el botón "Ver Listado de Especies" para averiguar si todas las especies encontradas en su proyecto están enlistadas y tienen un código (abreviatura) en CALCBOSK. Si falta un(as) especies, se puede utilizar códigos temporales como A, B, C, D hasta que la Reserva asigna códigos para estas especies. En estos casos, por favor de informar a la Reserva.																				
		<table><tr><th>Nombre común</th><th>Género</th><th>Especie</th><th>Abreviatura</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	Nombre común	Género	Especie	Abreviatura																
Nombre común	Género	Especie	Abreviatura																			
12	Diámetro	Medir el DAP al centímetro más cercano. Ponga la cintadiamétrica a 1.30 m de la base del árbol. Los dibujos muestran las reglas para condiciones anormales. Pintar una marca en donde se tomó el diámetro del árbol.  Dos árboles  Tres árboles 																				
13	Altura Total	Medir la altura total al metro más cercano. Si el ángulo de la base al punto de medición excede 45 grados (por ejemplo, 100%), la distancia del árbol medido deberá de incrementarse para reducir el ángulo. Para árboles muertos con partes de arriba rotas, se deberá de estimar la altura total al metro más cercano comparando el árbol con otros árboles vivos de diámetros y especies similares. Usando el hipsómetro, mida la altura hasta 1.10 metros desde la base hasta la copa del árbol. También se puede usar el clinómetro.  Si el ángulo A es positivo y el ángulo B' es negativo, se suman las dos alturas  Si el ángulo A es positivo y el ángulo B es positivo, se resta la altura de B a la altura de A																				
14	Longitud de la Copa	Usando el hipsómetro, mida la longitud de la copa. Cuando la copa del árbol no está bien definida se toma un promedio de las ramas visiblemente más altas.																				
14	Longitud de la Copa	Usando el hipsómetro, mida la longitud de la copa. Cuando la copa del árbol no está bien definida se toma un promedio de las ramas visiblemente más altas.																				
		 Si el ángulo A es positivo y el ángulo B es negativo, se suman las dos alturas. Esto es lo más común. Si el ángulo A es positivo y el ángulo B es positivo, se restan la altura de B a la altura de A																				

16	Referencia al Centro	Seleccionar al menos dos árboles y medir la distancia desde el centro del árbol hasta el centro del punto y los grados a los que se localiza el árbol. Es preferible seleccionar los árboles que estén separados de 20 grados hasta 160 grados en relación con el centro del punto.
17	Incremento de los últimos 5 años	Seleccionar un pino por cada posición (dominante, co-dominante, o suprimido) representado en la parcela. Sera normal no encontrar algunas posiciones en las parcelas (todos son co-dominante, por ejemplo). Con el taladro, sacar una prueba de que el árbol cuenta con al menos 5 anillos. Medir la longitud de los 5 anillos en milímetros tomando en cuenta hasta las décimas. Esto se requiere en la ausencia de mediciones en la parcela repetidas o un modelo de crecimiento viable para cada especie.
18	Defecto en el árbol	Anotar un porcentaje si el árbol está roto, tiene cavidad, u otro que disminuye la biomasa. Anotar la porción actual del defecto en cada sección del árbol (Observado como si fuera aplicado a todo el árbol). Por ejemplo, 100% si la porción entera está faltando (en otras palabras, defecto total), 0% si no le falta nada (en otras palabras, no hay defecto). El 0% es el valor por defecto en CALCBOSK.

FUENTE: Climate Action Reserve (CAR, 2022)