UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

Análisis de los servicios ecosistémicos de provisión en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

MORALES CORTEZ FERNANDA ESTEFANIA

JURADO DE EXAMEN

DIRECTOR: M EN C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

ASESOR: DR. ARCADIO MONROY ATA

ASESORA: DRA. PATRICIA RIVERA GARCIA

SINODAL: M EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL

SINODAL: BIOL. AIDA CRUZ ZAPATA

CIUDAD DE MÉXICO **29-Abril-2025**

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme un lugar en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FES Zaragoza) donde pude desarrollar mis habilidades intelectuales y el amor a mi carrera. A lo largo de mi instancia en la FES Zaragoza pude hacer amistad con personas que me apoyaron en todo el proceso de titulación, además tuve la oportunidad de tomar clase con grandes profesores. A quienes recordaré con mucho afecto por la pasión con la que transmitían conocimientos.

A mi director de tesis M en C. German Calva Vázquez por aceptarme en su Laboratorio de Contaminación Atmosférica, la cual se convirtió en mi segunda casa, además de brindarme su tiempo, dedicación y paciencia. Durante mi formación siempre estuvo al pie del cañón compartiéndome sus conocimientos y experiencia.

A mis respectivos sinodales: Dra. Patricia Rivera García, M en C. Armando Cervantes Sandoval, Dr. Arcadio Monroy Ata y Biol. Aida Cruz Zapata por brindarme todo su apoyo en mi proceso de titulación, cediéndome parte de su tiempo y dando consejos para mejorar.

A mis compañeros de Laboratorio de Contaminación Atmosférica por su apoyo en la colecta y registro de datos.

Agradecimientos personales

A la persona que siempre estuvo a mi lado mi mamá Mireya Morales Cortez sin tu apoyo, esfuerzo y amor nunca hubiera podido llegar hasta dónde estoy el día de hoy, siempre fuiste mi ejemplo y mi inspiración para ser alguien en la vida. Me satisface poder concluir mi carrera ya que todas las esperanzas que depositaste en mi están por dar frutos. ¡Lo hicimos! TE AMO MAMA.

A mi hermana Giovanna Cruz Morales por todas las noches que te tuve en vela ayudándome a estudiar para mis exámenes y exposiciones, además de darme ánimos siempre ¡TE QUIERO HERMANA!

A mi abuelo Antonio Morales por todo el apoyo y amor que me has brindado desde que te conocí, siempre seremos compañeros de la vida. ¡Te amo, compañero!

A las personas que ya no están: mi abuela Hilda Cortes, aunque nuestro tiempo juntas fue breve toda la vida me brindaste tú amor. A mi tío José Morales, porque siempre estuviste presente en mi vida, dándome consejos y amor. Siempre me apoyaste en todo, fuiste mi cómplice y mejor pareja de baile. Un beso hasta el cielo a los dos.

A mí novio Leobardo por todas las veces que me apoyaste llevándome a los museos, a la universidad, a comprar mi material, fuiste a quién más le toco mi desesperación y frustración, sin embargo, nunca me dejaste sola ni perdiste las esperanzas en mí. Tú apoyo fue muy importante para mí.

Finalmente, gracias a mí pues me costó mucho esfuerzo, dedicación, desvelo, lágrimas y estrés poder terminar mi carrera, sin embargo, sé que todo valdrá la pena, pues no existe mayor satisfacción que la que provoca cumplir un sueño. A partir de este momento comienzo una nueva etapa llena de éxitos y alegrías.

"Solo imagina lo precioso que es arriesgarse y que todo salga bien".

Mario Benedetti

Dedicatoria

A las personas que más amó: mi mamá y mi hermana.....

ÍNDICE

1| Resumen ix
2| Introducción 1
3| Marco Teórico 3
3.1 Servicios ecosistémicos (SE). 3
3.2 Servicios ecosistémicos de provisión (SEP) 3
3.2.1 Secuestró y almacén de carbono. 4
3.2.2 Producción de oxígeno. 5
3.2.3 Remoción de contaminantes. 6
3.3 Software i-tree Eco. 7
3.4 Deterioro del Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA). 8
3.4.1 Perdida de suelo. 8
3.4.2 Tala. 9
3.4.3 Incendios. 9
3.4.4 Agricultura. 10
3.5 Contaminación atmosférica en la delegación Tlalpan. 10
4| Antecedentes. 14
5| Planteamiento del problema. 17
5.1 Pregunta de investigación. 18
6| Objetivos. 18
6.1 General: 18
6.2 Particulares: 18
7| Método. 18
7.1 Área de estudio. 18
7.1.1 Clima. 19
7.1.2 Vegetación. 19
7.1.3 Edafología. 20
7.2 Trabajo de gabinete. 20
7.3 Trabajo de campo. 21
7.3.1 Toma de datos. 21
7.4 Trabajo de laboratorio. 22
Cálculo de los SEP 23

7.4.1 Almacenamiento de carbono..... 23
7.4.2 Producción de oxígeno. 23
7.4.3 Remoción de contaminantes..... 23
8| Resultados y discusión 24
8.1 Secuestro y almacén de carbono..... 26
8.2 Producción de oxígeno. 30
8.3 Eliminación de contaminantes..... 33
9| Conclusiones 38
10|Sugerencias..... 39
11| Referencias..... 40
Anexos..... 48
Anexo 1 Criterios visuales de registro dendrométricos, I tree Eco (Barcham, 2020). 48
Anexo 2. Formato de registro de datos dendrométricos (Autoría, 2024) 49
Anexo 3 Coordenadas y fecha de muestreos en el PNCA. 50
Anexo 4. Copa faltante, UFORE (2003). 51
Anexo 5. Ecuaciones para el cálculo de carbono por especie (PAOT, 2010). 52
Anexo 6. Tablas de etapa de ciclo de vida de las especies dominantes 53
Anexo 7. Tabla de salud de copa de los arboles sensados..... 54
Anexo 8. emisión de COVs por especie arbórea del PNCA (I-tree Eco, 2024)..... 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los servicios ecosistémicos (Autoría). 3
Figura 2 Servicios ecosistémicos de provisión en el PNCA (Autoría). 4
Figura 3 Entradas de i-tree Eco (izquierda) y salidas (derecha) Tomada de (i-tree tools, 2018). 8
Figura 4 Deterioro del PNCA, presencia de tocones, árboles talados y abandonados Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024). 9
Figura 5 Distribución de O3 en la ZMVM Tomada de (SEDEMA, 2021a). 11
Figura 6 Distribución de NOx en la ZMVM Tomada de (SEDEMA, 2021b). 12
Figura 7 Distribución de SO2 en la ZMVM Tomada de (SEDEMA,2021b). 13
Figura 8 Distribución de PM10 (derecha) y PM2.5 (izquierda) en la ZMVM Tomada de (SEDEMA,2021b). 14
Figura 9 Deforestación en los principales ecosistemas de México Tomada de (CONAFOR, 2022). 15
Figura 10 Fotografía satelital del PNCA a) zona de amortiguamiento y b) zona rala Tomada de (Google earth, 2025). 17
Figura 11 Zona de estudio y puntos de muestreo Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024). 19
Figura 12 Muestreo por parcelas circulares Tomada de (CONAFOR, 2012). 21
Figura 13 Trabajo en campo: a) toma de DAP, b) marcado de centro de la parcela, c) registro de datos dendrométricos y d) medición de ancho de copa Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2023). 22
Figura 14 Tocones, resultado de la tala en el PNCA en el año 2024. 25
Figura 15 Secuestro y almacén de carbono total en el PNCA (Autoría). 26
Figura 16 Pinos en etapa de vida brinzal-juvenil Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024). 27
Figura 17 Principales árboles secuestradores de carbono en el PNCA (Autoría). 29
Figura 18 Principales arboles con mayor almacén de carbono en el PNCA (Autoría). 30
Figura 19 Producción de oxígeno total en el PNCA (Autoría). 31
Figura 20 Principales árboles productores de oxígeno en el PNCA (Autoría). 32
Figura 21 Remoción de contaminantes total en el PNCA (Autoría). 34
Figura 22 Contaminación de la CDMX Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024). 35
Figura 23 Árboles de Pinus con copas pobres, presencia de neblina y ramas y troncos talados Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024). 36
Figura 24 Paraje "Valle del Tezontle Ajusco" ejemplo de falta de abundancia y biomasa arbórea Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2018). 36
Figura 25 Principales árboles eliminadores de contaminación en el PNCA (Autoría). 37

ÍNDECE DE TABLAS

Tabla 1 Almacenamiento de carbono en la Cuenca Río de la Magdalena. 16
Tabla 2 Concentración de O3 en AJU, DDL e IZP..... 16
Tabla 3 Inventario de los SE del PNCA 2019. 17
Tabla 4 Diversidad del PNCA del año 2024..... 24
Tabla 5 Diversidad del PNCA del año 1996..... 25
Tabla 6 Comparación de la producción de oxígeno en el PNCA para los años 1996 y 2024. 31
Tabla 7 Lista de especies recomendadas para reforestación en el PNCA. 39

1| Resumen

El objeto de la investigación es analizar los servicios ecosistémicos de provisión (secuestro, almacén de carbono, producción de oxígeno y remoción de contaminantes) para identificar las especies con mayor potencial. La colecta de datos se realizó en los meses: octubre del 2023, febrero y marzo del 2024 y el registro se ejecutó de acuerdo con lo descrito por el manual de la UFORE (2003); a partir de datos dendrométricos: diámetro normal, altura total del árbol, altura a la base y la fustal de la copa, muerte regresiva, copa faltante, y ancho de copa. El cálculo de los servicios ecosistémicos de provisión se realizó con el software i-tree Eco. El resultado del inventario forestal arrojo un total de 652 árboles, distribuidos en 10 especies. Cuyo secuestro y almacén fue de 993.6 kg/ año y 96,932 kg de carbono, respectivamente. La producción de oxígeno fue de 2,652 kg/año, mientras la remoción de contaminantes fue de 148 kg/ año. Se concluyo que las especies de mayor relevancia son: *Pinus leiophylla*, *Abies religiosa* y *Pinus patula*. Por lo tanto, se sugiere que tengan prioridad en futuras reforestaciones en el PNCA.

2| Introducción

Los bosques periurbanos son sistemas compuestos por árboles, ubicados en manchas urbanas o en la periferia de las grandes ciudades. Estos ecosistemas tienen el potencial de ofrecer diferentes tipos de servicios ecosistémicos (cultural, soporte, regulación y provisión) los cuales benefician directamente a los seres humanos. La calidad y cantidad de los servicios ecosistémicos depende de la salud del bosque (condición de copa y presencia de plagas) y de las actividades del hombre (aumento de la contaminación del aire, tala clandestina, pastoreo y cambio de uso de suelo).

El Parque Nacional Cumbres del Ajusco ha sido deteriorado por la dirección del viento provocando que la zona reciba el aire contaminado proveniente de la CDMX Alvarado et al., (1993), lo anterior afecta la salud humana causando problemas respiratorios, cardiacos y agravamiento de enfermedades, también afecta drásticamente la salud del bosque provocando: clorosis en hojas, senescencia prematura y la muerte del árbol. Además, desde su decreto como Parque Nacional el 19 de mayo de 1947 el Ajusco no cuenta con un plan de manejo.

Otros autores, como Vargas-Márquez (1997) concuerdan con lo anterior, pero también suman otros factores que contribuyen a su deterioro como: la tala ilegal de *Abies religiosa* y *Quercus ilex* las cuales son empleadas en la industria maderera (Rico 2021).

Por su parte en México el segundo ecosistema más deforestado son los bosques templados, ecosistema al que pertenece el Ajusco (CONAFOR, 2022). Lo anterior repercute directamente en la disminución de la abundancia de especies arbóreas presentes en el Ajusco.

Los servicios ecosistémicos son objeto de estudio en la república mexicana en los estados: Colima, Yucatán, Puebla y Durango, sin embargo, para el Parque Nacional Cumbres del Ajusco la literatura de este tipo es limitada, por lo anterior de la problemática que padece, se hará énfasis en los servicios ecosistémicos: secuestro, almacén de carbono, producción de oxígeno y remoción de contaminantes. El cálculo y análisis de ellos, permitirá identificar las especies arbóreas con mayor potencial, proporcionando opciones adecuadas para la reforestación de la zona, contrarrestando la disminución de biomasa y abundancia. Asimismo, se busca ofrecer las bases para que los tomadores de decisiones elaboren un plan de manejo para el Ajusco e inviertan más recursos para su conservación.

3| Marco Teórico

3.1 Servicios ecosistémicos (SE).

Son aquellos bienes y servicios proporcionados por la naturaleza, pueden ser tangibles e intangibles y son principalmente aprovechados por los seres humanos. Según la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA) en 2005 se pueden clasificar en cuatro categorías: **provisión, regulación, culturales y soporte** (figura 1) (Camacho-Valdéz y Ruiz-Luna, 2011).

Figura 1 Clasificación de los servicios ecosistémicos (Autoría).

3.2 Servicios ecosistémicos de provisión (SEP)

Son bienes y productos obtenidos de la naturaleza, su aprovechamiento puede ser directo o con previo procesamiento.

Los ecosistemas boscosos ofrecen múltiples SE sin embargo, en la presente investigación se centrará la atención en los SEP: producción de oxígeno (O_2), remoción

de contaminantes, secuestro y almacén de carbono (C) ya que estos en su conjunto son los responsables de proveer aire puro, elemento vital para la vida (figura 2), su prestación depende de varios factores: salud de los bosques (condición de copa y presencia de plagas), estructura del bosque (diversidad y abundancia), condiciones del sitio (clima y concentración de contaminación) y características propias de los árboles (morfología, etapa de vida, permanencia del follaje entre otras).

A continuación, se relata el papel de estos servicios en la provisión de aire puro.

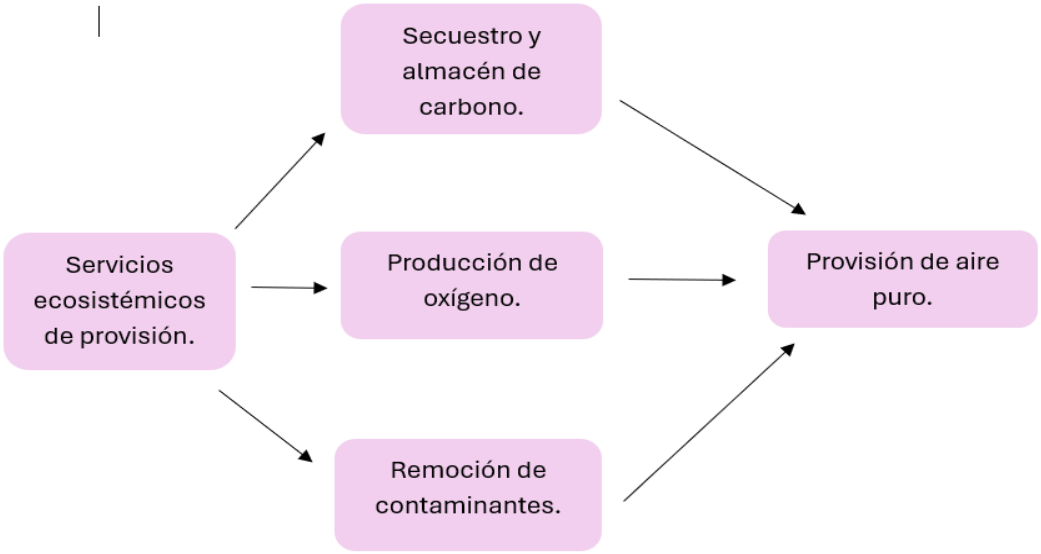


Figura 2 Servicios ecosistémicos de provisión en el PNCA (Autoría).

3.2.1 Secuestró y almacén de carbono.

La contaminación atmosférica es uno de los fenómenos que afecta la condición de salud forestal. El aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO_2) en el aire resalta la importancia de los árboles, ya que disminuyen su concentración y aumentan la tasa de eliminación de CO_2, mediante la captura y almacén de C. Pues es uno de los principales gases de efecto invernadero, además es el responsable de afectaciones

a la salud como: dolor de cabeza, malestares cardiacos, mareos, fatiga y disminución de la concentración.

Cuando los árboles capturan y almacenan CO_2, este se integra en los procesos metabólicos, como la fotosíntesis, el C se deposita en el follaje, tallos, sistema radicular y en mayor cantidad en el tejido leñoso de troncos y ramas principales de los árboles (Baldocchi et al., 2018).

Los bosques, especialmente los tropicales, son sumideros de carbono muy efectivos. Se estima que una hectárea de bosque maduro puede absorber aproximadamente de 10 a 30 toneladas de CO_2 al año. En 2017 la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) registro que, en México, los ecosistemas forestales capturan alrededor de 188.3 millones de toneladas de CO_2 anualmente.

La captura de carbono está determinada por distintos factores como: edad del árbol, suelo, altura, pendiente, precipitación y biomasa. Se calcula que alrededor del 80% del C se encuentra almacenado en los bosques, de este el 49% está en los bosques templados de alta altitud, el suelo forestal de este tipo de bosque almacena el 84% del total de C contenido por el bosque (Ciesla, 1996).

El incremento de C almacenado se refleja en el aumento de altura, grosor del tronco y extensión de las ramas (Ordóñez y Masera, 2001).

3.2.2 Producción de oxígeno.

Todos los seres vivos oxidan moléculas orgánicas lo que conlleva al gasto continuo del oxígeno presente en el aire. En el caso de los árboles las raíces toman el agua del suelo y las hojas absorben CO_2. Posteriormente la fotosíntesis es la encargada de compensar el gasto de O_2, procedente del agua (H_2O) este se expulsa

a la atmosfera restaurando el nivel que se había disminuido por la respiración de animales y vegetales (Sanmartín, 2015).

Durante la fotosíntesis se absorbe CO_2, pero si se excede la liberación de este por la respiración el árbol acumulará C (secuestro de C). De este modo si el árbol tiene una acumulación neta de C, por consecuencia también tendrá una producción de O_2 neta (Nowak et al, 2007).

Los árboles más jóvenes producen más O_2 ya que secuestran más C, aumentando la velocidad de su tasa de crecimiento. Por el contrario, cuando llegan a la madurez, la liberación de O_2 disminuye, ya que solo generan la cantidad necesaria para su propia respiración (Ríos et al., 2019).

3.2.3 Remoción de contaminantes.

La contaminación del aire afecta significativamente la salud humana, en el año 2015 se le atribuyeron 4.5 millones de muertes en el mundo, pues es la responsable de: agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorios (asma y dificultad para respirar).

En Europa se le atribuye al material particulado 238,000 muertes al año (Nowak,2020) en México se reportan 48,000 muertes relacionadas con la contaminación del aire (Tapia, 2024)

Los árboles purifican el aire contaminado mediante dos mecanismos:

1. Absorción de la contaminación gaseosa a través de los estomas de las hojas, posteriormente los gases se difunden en los espacios intercelulares y finalmente son absorbidos por el agua.

2. Retención de partículas en la superficie de las hojas, sin embargo, las partículas son suspendidas nuevamente a la atmosfera por efecto de lluvia o la caída de las hojas y ramas, por lo anterior los árboles son reservorios temporales.

La eliminación de contaminantes del aire por la vegetación puede variar según la cantidad de cobertura vegetal, la concentración de contaminantes, salud y características propias del arbolado (Nowak et al., 2006).

3.3 Software i-tree Eco.

Es un software desarrollado por particulares y el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Es una herramienta que cuantifica SE (secuestro, almacén de C, producción de O_2, eliminación de contaminantes, escurrimiento evitado, emisión de compuestos orgánicos volátiles entre otros) con el fin de gestionar los bosques naturales y urbanos.

Para alimentar el software se requiere proporcionar lo siguiente:

- Datos dendrométricos: Diámetro normal (DN), alturas total del árbol , fustal, a la base de la copa y ancho de copa.
- Condición del arbolado: Porcentaje de copa faltante y muerte regresiva.
- Datos de clima: Precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa por hora
- Datos de contaminación: Concentración de O_3, CO, PM_{10}, PM_5, NO_2 y SO_2 por hora de una red de monitoreo atmosférico (la más cercana al área de estudio).

Una vez ingresado los datos (figura 3) i-tree Eco estima:

- **Estructura**: Número de especies, densidad y condición de salud del arbolado.
- **Carbono**: Almacenamiento y tasa de captura de carbono anual por el arbolado.
- **Oxígeno**: Producción de oxígeno anual por especie arbórea.

- **Remoción de contaminantes**: Cantidad de contaminantes removidos del aire (PM_{10}, PM_5, O_3, NO_2, SO_2 y CO).
- **Valoración económica**: Estimación del valor económico de los servicios ambientales que provee el arbolado.
- **Control de escurrimientos**: Estimación de los escurrimientos controlados por especie arbórea y por estrato
- **Pronostico**: Modelo de crecimiento de los árboles censados, tomando en cuenta la mortalidad, tasa de crecimiento, impacto de plagas y enfermedades (i-tree tools, 2018).

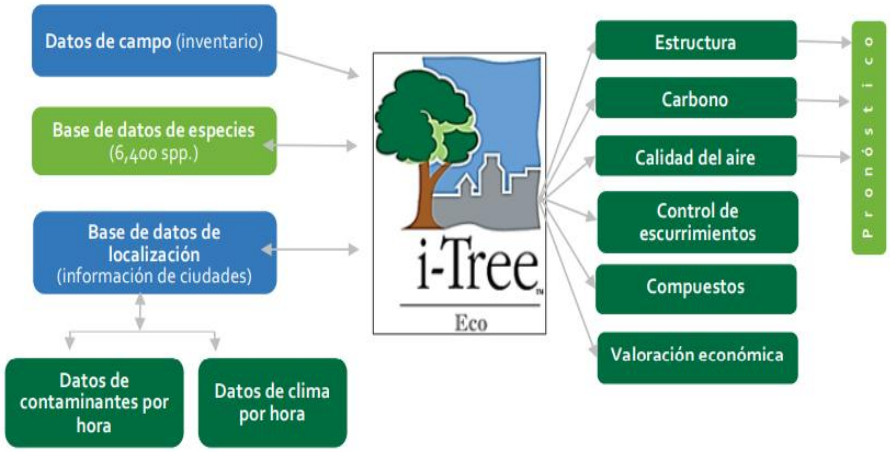


Figura 3 Entradas de i-tree Eco (izquierda) y salidas (derecha) Tomada de (i-tree tools, 2018).

3.4 Deterioro del Parque Nacional Cumbres del Ajusco (PNCA).

Vargas-Márquez (1997) describe como se ha degradado el PNCA a continuación, se mencionarán los principales factores:

3.4.1 Perdida de suelo.

Inicialmente el PNCA fue decretado como Parque Nacional el 26 de agosto de 1936, en el decreto la zona contaba con 69,750 hectáreas (ha), abarcando el sur de la CDMX, porciones del estado de México y Morelos; sin embargo, perdió el 98.7% de su

cobertura original, quedando en 920 ha decretadas el 21 de febrero 1947, las hectáreas pérdidas fueron cedidas a la empresa papelera Loreto y Peña Pobre, para la explotación del bosque (Hernández, 1994).

3.4.2 Tala.

El bosque de *Abies religiosa* ha sido susceptible a la tala (1825-1992) por las empresas madereras (Loreto y Peña Pobre) dado que utilizaban la madera como materia prima por su alto contenido de celulosa, también se utiliza para la venta (Vargas-Márquez, 1997). Actualmente sigue siendo víctima de la tala clandestina (figura 4).

Figura 4 Deterioro del PNCA, presencia de tocones, árboles talados y abandonados
Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024).

Con la constante tala del terreno, se aumenta la sensibilidad de los suelos a la erosión del viento y agua, lo que se traduce en una pérdida del 20-50% del carbono almacenado, también se ha disminuido el hábitat de la fauna silvestre (Ciesla, 1996).

3.4.3 Incendios.

El Parque ha sufrido incendios forestales a causa de descuidos humanos, ráfagas de viento, así como la tala (Vargas-Márquez, 1997). En marzo 2017 la CONAFOR registro un incendio en el Pico del Águila, afecto 70 ha del terreno. Por otra

parte, la SEDEMA en 2020 reporto 865 incendios forestales, los cuales afectaron 4,302.05 ha del área del suelo de conservación de la Ciudad de México (incluyendo Tlalpan). Sin embargo, no se ha documentado la superficie especifica que corresponde al Ajusco. Mas tarde en febrero 2021 se registró un incendio que dejo más de 13 ha afectadas, en el mismo año, pero en marzo se registró otro incendio que afecto aproximadamente 10 ha (Redacción adn40, 2021).

La quema de biomasa incluye todas aquellas actividades humanas que llevan a la quema de la vegetación, con el fin de estimular la regeneración de pastos para el ganado.

El bosque de *Pinus hartwegii* es la comunidad más deteriorada, ha sido desplazado por el pastizal amacollado *de Festuca, Calamagrostis y Muhlenbergia,* (Vargas-Márquez, 1997).

3.4.4 Agricultura

A los alrededores del PNCA hay pueblos agricultores como: Santo Tomas Ajusco, Juchitepec, Tepetlixpa entre otros, la agricultura ha contribuido al deterioro de la zona ya que, se disminuye la cubierta vegetal (para permitir la siembra) lo que a su vez hace posible la erosión del suelo por los vientos, provocando que los suelos se erosionen (Hernández, 1994).

3.5 Contaminación atmosférica en la delegación Tlalpan.

3.5.1Ozono (O_3).

Contaminante secundario que deriva del ciclo fotoquímico de los óxidos de nitrógeno, es emitido principalmente por automóviles y camiones. Es el responsable de acelerar el envejecimiento de las hojas, provocando senescencia prematura,

disminuyendo la fotosíntesis y la asimilación de CO_2, degradando la clorofila con la consecuente reducción de la biomasa vegetal (Ribas et al., 2004).

Otras investigaciones reportan efectos en el follaje de los bosques templados como: clorosis foliar, caída de acículas seguido de la activación de la senescencia prematura, culminando con la muerte de los árboles (Alvarado-Rosales et al., 2017).

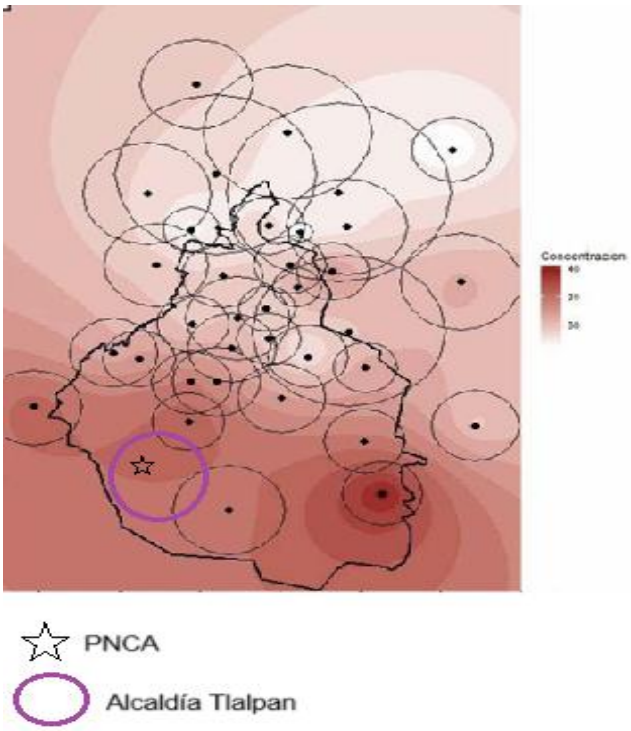


Figura 5 Distribución de O3 en la ZMVM Tomada de (SEDEMA, 2021a).

Según la SEDEMA la concentración de O_3 en Tlalpan es de 30-35ppm para el año 2021 (figura 5).

3.5.2 Óxido de nitrógeno (NO_X).

Se sintetizan a partir de N_2 y descargas eléctricas de los relámpagos, suscitando NO_2. Las erupciones volcánicas, los combustibles fósiles y la actividad bacteriana de los humedales contribuyen con diversos estados de oxidación del nitrógeno.

Granados-Sánchez y colaboradores (2010) reportaron que los NO_X son precursores de la lluvia acida, esta causa perdida de nutrientes del suelo: calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg) lo que provoca mayor susceptibilidad a los árboles.

En el año 2018 la SEDEMA registro para la alcaldía Tlalpan una concentración <14.0 ton/año de NO_x (figura 6). La velocidad de absorción en las hojas es de 2.000 microgramos (µg) /m^2 /hora (Sanmartín, 2015).

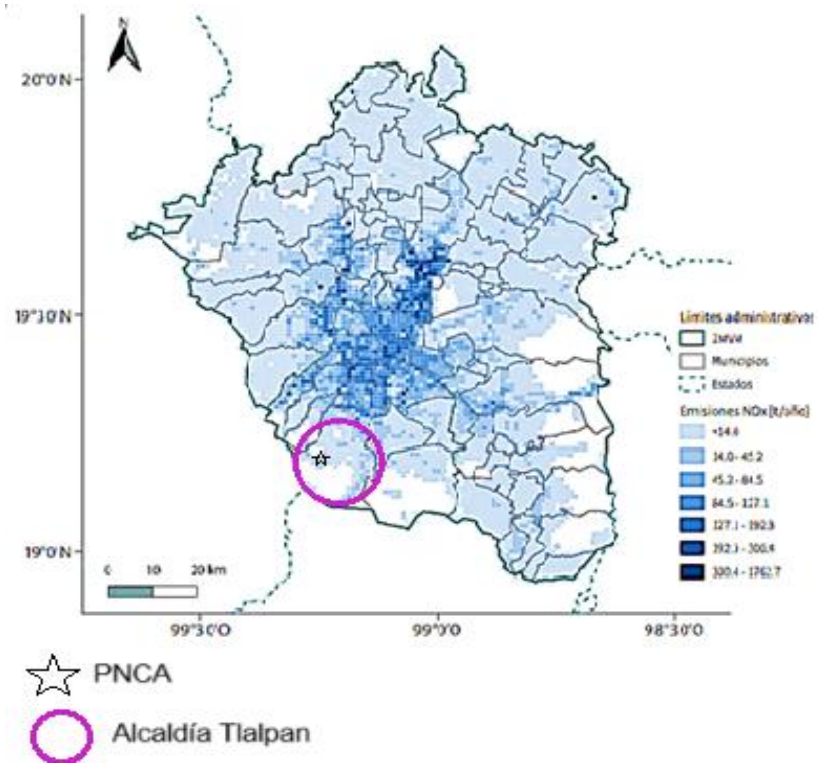


Figura 6 Distribución de NOx en la ZMVM Tomada de (SEDEMA, 2021b).

3.5.3 Dióxido de azufre (SO_2).

El origen del SO_2 se deriva de las acciones antropogénicas (combustibles fósiles, e industria) y fenómenos naturales (actividad volcánica, descomposición de la materia orgánica).

Los efectos de este contaminante en los bosques son: necrosis foliar y clorosis de las hojas. Además, hay disminución del crecimiento de los árboles, así como aumento de la senescencia prematura. También provoca alteraciones en el ciclo de

los nutrientes como empobrecimiento de los suelos seguido de perdida de la cobertura vegetal (Arrebola et al., 2004).

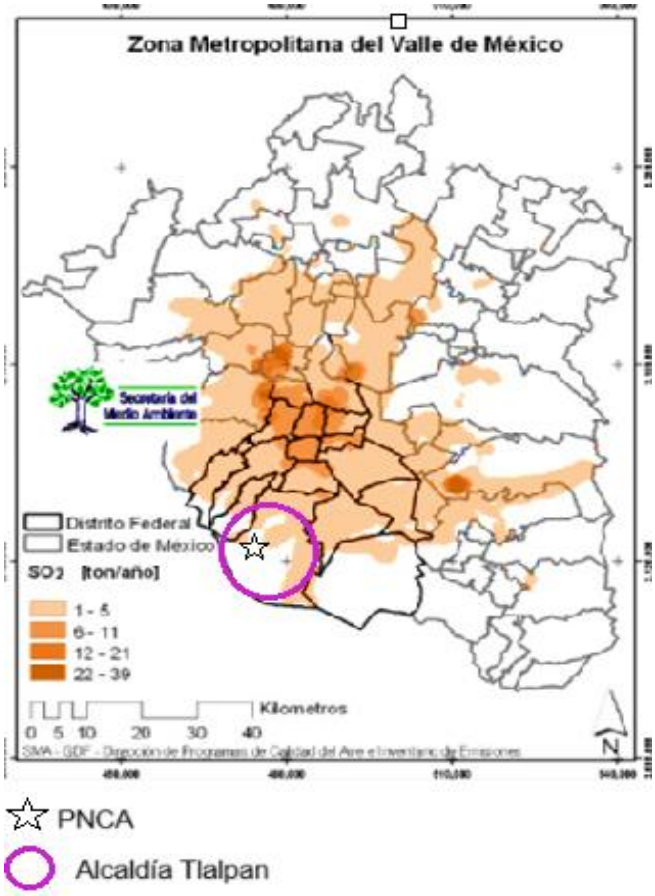


Figura 7 Distribución de SO2 en la ZMVM Tomada de (SEDEMA,2021b).

En la alcaldía Tlalpan la concentración de SO_2 en 2008 fue de 1-5 ton\año (figura 7). Es absorbido por las hojas a razón de 500 µg/m^2 por hora, el contenido normal de azufre (S) en las hojas es de 1.7 g/kg (Sanmartín, 2015).

3.5.4 Material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Es una mezcla de compuestos químicos (orgánicos volátiles, sales, metales, entre otros) producto del hollín, polvo de la agricultura, partículas resultantes de los procesos productivos y empresas cementeras (Arciniegas, 2012). Provoca daños a los bosques como: degradación de la cutícula, lo que conlleva a la disminución de la tolerancia de las hojas a la sequía, heladas y smog. También daña las ceras epicuticulares y causa obstrucción de las estomas, muerte de tejidos, senescencia prematura, así como reducción de la actividad fotosintética en los árboles (Gómez,

2022). En 2008 la SEDEMA registró concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ de 6-10 ton/año y 1-2 ton/año, respectivamente en la alcaldía Tlalpan (figura 8).

Amanera de resumen se dan las concentraciones de contaminantes a los que se ve sometido el bosque de pino-oyamel del Ajusco.

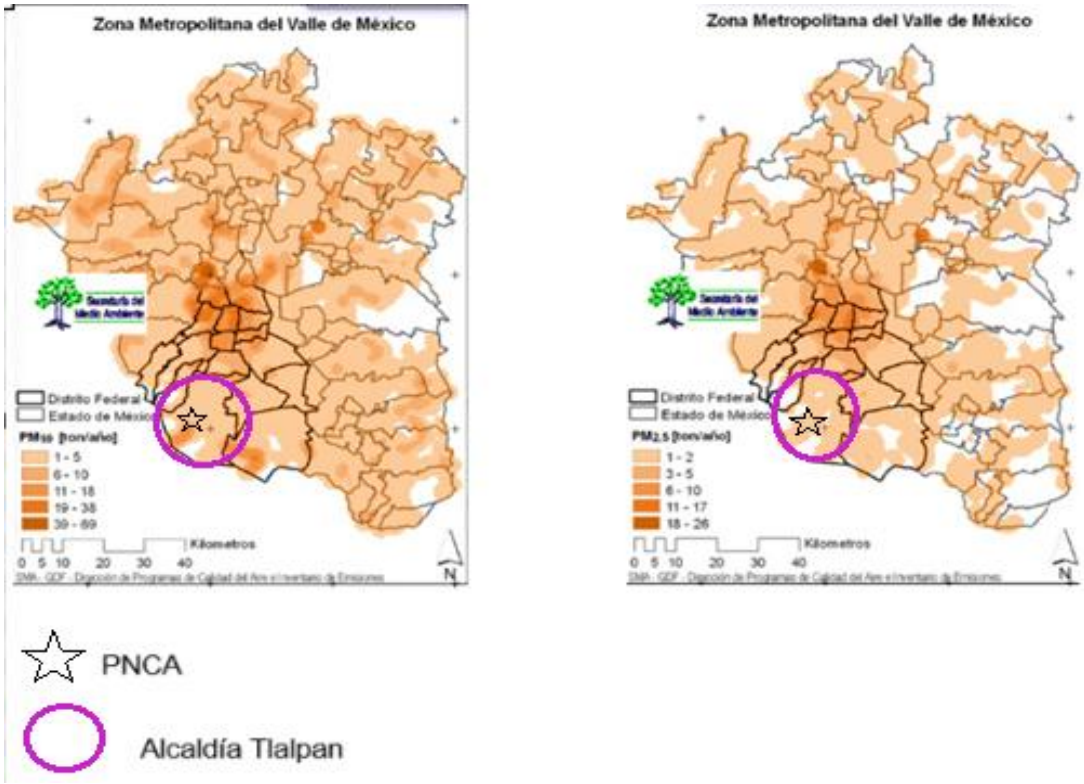


Figura 8 Distribución de PM10 (derecha) y PM2.5 (izquierda) en la ZMVM Tomada de (SEDEMA,2021b).

4| Antecedentes.

Alvarado et al., (1993) concluyen que los ecosistemas boscosos más afectados por el efecto de la contaminación del aire son los que están ubicados en el barlovento, respecto a la CDMX, ya que el viento corre en dirección N-NE a S-SO. Tal es el caso del Ajusco, que es golpeado por el aire contaminado, provocando perdida gradual del follaje de los árboles, así como defoliación culminando con la muerte. Además, mencionan que los bosques que cuentan con una adecuada gestión presentan menor

deterioro dado que hay menor competencia por nutrientes, humedad y luz, sin embargo, este no es el caso del Ajusco pues no cuenta con un plan de manejo.

En México existen diversos estudios de servicios ecosistémicos realizados con i tree Eco en los estados: Mérida (De la Concha y Roche, 2018), Estado de México (Martínez et al., 2021; González-Hernández et al., 2023), Durango (Pérez et al., 2023), Puebla (Hernández-Castán et al., 2023) y Colima (Vázquez et al., 2023.

La CONAFOR (2022) informo que en México se ha registrado una tasa anual de deforestación promedio de 208,80 ha/año para el periodo 2001-2021 lo anterior representa el 0.31% de la superficie forestal a nivel nacional (66.65 millones de hectáreas). Para el año 2019 se registró una tasa anual de deforestación de 226,581 hectáreas, la cual se redujo en un 26% para el 2021 (167,811 hectáreas). En México el principal ecosistema deforestado son los matorrales xerófilos (41.2%), seguido de los bosques templados (24.24%); selvas (21.7%) y manglares (1.06%) (figura 9).

Ecosistemas	Situación y superficies
Bosque tropical	México contaba originalmente con cerca de 22 millones de hectáreas de selvas húmedas o bosques tropicales perennifolios. Se estima que actualmente queda 60% de la extensión original de estos ecosistemas, de los cuales 35% son selvas de vegetación primaria.
Bosque templado	A principios del siglo XIX los bosques templados de coníferas, encinos y otras latifoliadas llegaban a cubrir alrededor de 50 millones de hectáreas. Hoy se cuenta con 33.5 millones de hectáreas. El ritmo de pérdida de superficie de bosques templados ubica a México entre los países con mayor índice de deforestación.
Humedales	México ocupa el quinto lugar dentro de los países con mayor superficie de manglar en el mundo. Es también uno de los países donde más superficie de manglar se pierde: la FAO calcula que, desde 1980, en nuestro país se pierden anualmente entre 10 mil y 40 mil hectáreas de manglar.

Figura 9 Deforestación en los principales ecosistemas de México Tomada de (CONAFOR, 2022).

Almeida-Leñero et al., 2007 estimaron el almacén de carbono de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* de la Cuenca Río de la Magdalena (CRM) a partir de los siguientes parámetros: altura, área basal y diámetro normalizado. Concluyeron que el bosque de *Abies religiosa* almacena más carbono (tabla 1).

Tabla 1 Almacenamiento de carbono en la Cuenca Río de la Magdalena.

Especie	Hectáreas	Almacén de carbono
Abies religiosa	1,433	83,603,000 kg/año
Pinus hartwegii	1,014	44,564,000 kg/año

Calderón (2009) analizó el estado forestal del Ajusco, concluyendo que la mayor parte del bosque se encuentra sin cobertura, lo anterior como resultado de la rápida urbanización, lo que conlleva al aumento de la contaminación del aire.

Alvarado-Rosales y colaboradores 2017 compararon la cantidad de ozono presente en Desierto de los leones (DDL), Iztaccíhuatl-Popocatépetl (IZP) y El Ajusco (AJU) con monitores pasivos en un periodo de noviembre 2004 a enero 2006. Los resultados obtenidos arrojan mayor concentración de ozono en AJU (tabla 2). Debido a que en IZP y DDL por su ubicación no están expuestos al aire contaminado de la CDMX.

Tabla 2 Concentración de O3 en AJU, DDL e IZP.

Zona	Concentración de O_3 (ppb)
AJU	38.87 ppb
DDL	28.34 ppb
IZP	28.60 ppb

El Laboratorio de Contaminación Atmosférica de la FES Zaragoza-UNAM elaboró un inventario para el PNCA en 2019 de 2,259 árboles muestreado en 1996-1998 los datos fueron procesados mediante el software i-tree Eco, a partir de esta evaluación, se obtuvieron los siguientes datos (tabla 3).

Tabla 3 Inventario de los SE del PNCA 2019.

Servicio ecosistémico	Valor obtenido
Eliminación de contaminantes	9,920 kg/año
Secuestro de Carbono	4,600 kg/año
Almacenamiento de Carbono	264,700 kg/año
Producción de Oxígeno	-1, 500 kg/año [1]
[1] la producción de O_2 es de negativa, dado que hay un déficit de oxígeno	

De las especies muestreadas *Pinus teocote* es la más representativa en producción de O_2, almacén y secuestro de C. Además de ser la especie dominante.

5| Planteamiento del problema.

El PNCA está siendo deteriorado a causa de: incendios, tala ilegal, falta de un plan de manejo, reducción de tierras (Vargas-Márquez, 1997) y por la contaminación recibida de la CDMX, pues se ubica en el barlovento de la Sierra del Ajusco (Alvarado-Rosas et al., 2017). Lo anterior está contribuyendo a alteraciones significativas en el arbolado: disminución de biomasa y reducción de la abundancia (figura 10) (Saavedra y Perevochtchikova, 2017). Los factores antes mencionados afectan la calidad y cantidad de SEP.

Figura 10 Fotografía satelital del PNCA a) zona de amortiguamiento y b) zona rala Tomada de (Google earth, 2025).

5.1 Pregunta de investigación.

A partir de determinar los servicios ecosistémicos de provisión: secuestro, almacén de carbono, producción de oxígeno y remoción de contaminantes y considerando las 10 especies inventariadas ¿Cuáles de ellas tienen mayor potencial en relación con los SEP en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco?

6| Objetivos.

6.1 General:

Analizar los servicios ecosistémicos de provisión (secuestro, almacén de carbono, producción de oxígeno y remoción de contaminantes) del Parque Nacional Cumbres del Ajusco del año 2024, para identificar las especies con mayor potencial.

6.2 Particulares:

- Comparar el secuestro y almacén de carbono para determinar si las especies con mayor relevancia se comparten en ambos servicios.
- Estimar la producción de oxígeno entre las especies arbóreas para identificar cuáles son las de mayor relevancia.
- Determinar la remoción total del PNCA, a fin de seleccionar las especies que eliminan más contaminantes del aire.

7| Método.

7.1 Área de estudio.

El Parque Nacional Cumbres del Ajusco (Vargas-Márquez, 1997) se ubica al sur de la CDMX en la alcaldía, Tlalpan (figura 11). Fue decretado como Parque Nacional el 21 de febrero de 1947, cuenta con una superficie de 920 ha. Lo distingue

su topográfica montañosa y accidentada, con elevaciones que van de 2,800 a 3,930 msnm.

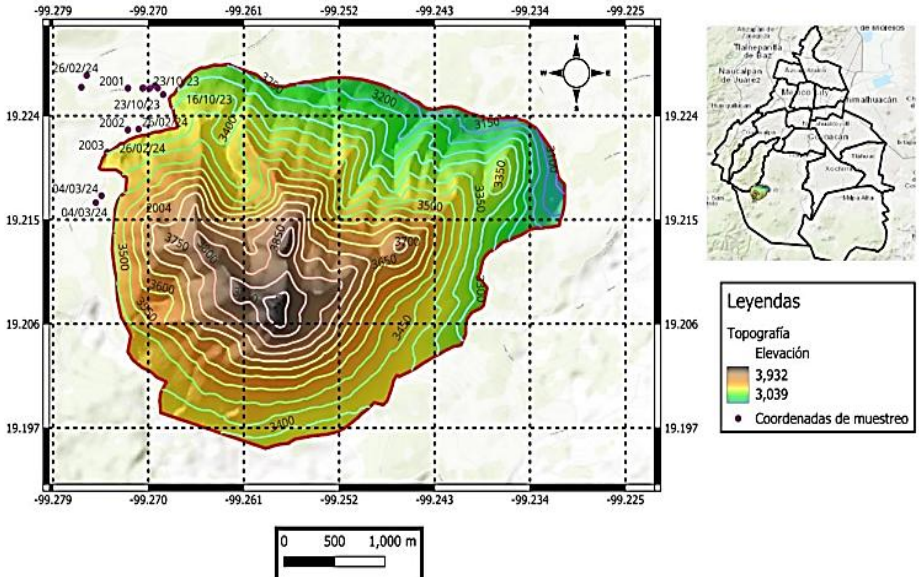


Figura 11 Zona de estudio y puntos de muestreo Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024).

7.1.1 Clima.

Templado semifrío, con temperatura media anual entre 5°C y 12°C. La temperatura del mes más caliente es menor a 22°C, y del mes más frío entre -3°C y 18°C. Respecto a la humedad relativa la mayor corresponde a septiembre con el 77%, el mes con la humedad relativa más baja es abril con el 44%. El mes con mayor precipitación es julio con 181 mm y el mes más seco es diciembre con 4 mm. (Atlas Weather, 2025).

7.1.2 Vegetación.

La distribución altitudinal decreciente es: pastizal en la parte más alta, con algunos ejemplares de *Pinus hartwegii.* Al descender la ladera, se encuentra matorral, por debajo de los 3,700-3,600 msnm, está el bosque de *Pinus hartwegii*. Por debajo de esta cota y hasta los 3,200 msnm se observa el bosque mixto donde se encuentra:

bosque de *Abies religiosa*, seguido de pinos (*Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y *Pinus pseudostrobus*), encinos (*Quercus laurina* y *Quercus rugosa*), Aile (*Alnus firmifolia* y *Alnus jorullensis*) y madroños (*Arbutus xalapensis*) (Saavedra-Díaz y Perevochtchikova, 2017).

7.1.3 Edafología.

El sustrato es de origen volcánico (poroso), por lo que no se forman ríos en la superficie entonces el agua se percola formando ríos subterráneos (Vargas-Márquez, 1997). Los suelos predominantes son:

- Andosoles: Abarca el 50% del parque se caracterizan por tener una baja densidad aparente, valores elevados de materia orgánica, porosidad y capacidad de retención de agua. Sin embargo, cuando se deshidratan, pierden estas propiedades de manera irreversible (Jiménez-Cruz, 2011).
- Litosol: Ocupan una extensión aproximada del 40%. Tienen una textura media, profundidad menor de 10 cm. Su susceptibilidad para erosionarse depende de la zona donde se encuentran (Hernández, 1994).

Conforme aumenta la altura se favorece el drenado del suelo, la materia orgánica (MO) tiende a aumentar conforme aumenta la altura (Fenn et al., 2002).

7.2 Trabajo de gabinete.

Búsqueda de artículos especializados para escribir los antecedentes, elaboración de mapa del área de estudio, se creó un formato para el registro de los datos dendrométricos de campo (anexo 2) y familiarización con el funcionamiento con el software i-tree Eco.

7.3 Trabajo de campo.

7.3.1 Toma de datos.

Se realizaron cinco muestreos en el PNCA (anexo 3). En cada zona se aplicó la técnica de muestreo por parcelas (CONAFOR,2012) de acuerdo con la (figura 12).

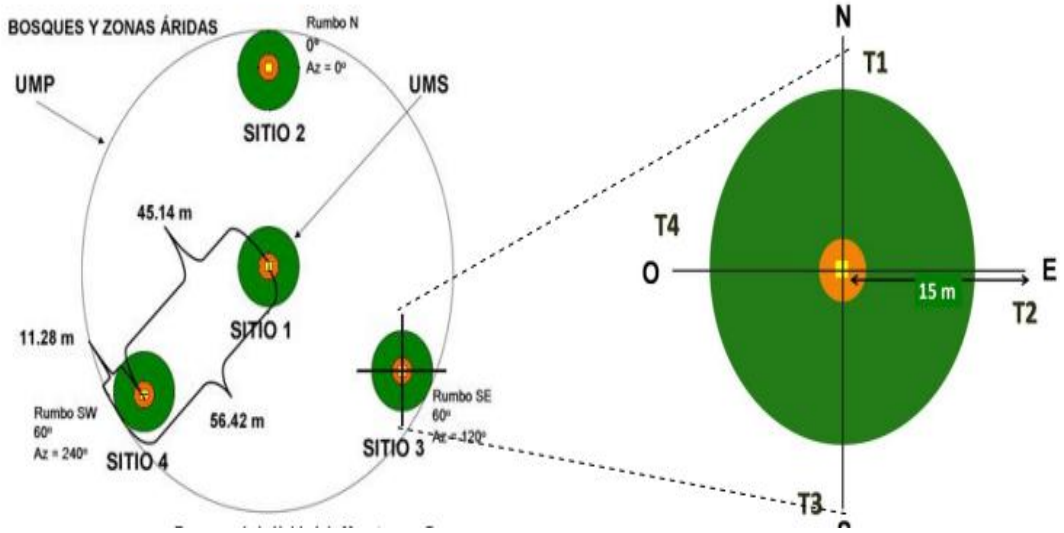


Figura 12 Muestreo por parcelas circulares Tomada de (CONAFOR, 2012).

Los datos registrados son: especie, diámetro normal (DN), alturas (total y al fuste) (figura 13), ancho de la copa, porcentaje de muerte regresiva y porcentaje de copa faltante (anexo 4) de acuerdo con el manual (UFORE, 2003).

Únicamente se considerarán aquellos árboles con un DAP mayor a ocho cm y 1.30 de altura total, como lo solicita el programa i-tree Eco.

Figura 13 Trabajo en campo: a) toma de DAP, b) marcado de centro de la parcela, c) registro de datos dendrométricos y d) medición de ancho de copa Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2023).

7.4 Trabajo de laboratorio.

Se registraron 652 árboles en el software i-tree Eco con las configuraciones: selección de inventario completo, para los cálculos de eliminación de contaminantes se registró la estación meteorológica Geografía UNAM (766810-99999), la más cercana a la zona de estudio, con registros de contaminación y estado del tiempo 2015.

Para el cálculo de los SEP el software utiliza ecuaciones, coeficientes y factores específicos para cada especie censada, estos se pueden consultar en los metadatos de i-tree Eco.

Cálculo de los SEP

7.4.1 Almacenamiento de carbono.

Se baso en el cálculo de la biomasa de cada individuo, utilizando las ecuaciones (anexo 5) definidas por PAOT (2010), para el cálculo de carbono por especie.

7.4.2 Producción de oxígeno.

Se calculó a partir del secuestro de carbono con base en los pesos atómicos (Nowak et al., 2007):

$$O_2 \text{ total} = \text{secuestro neto de C (kg/año)} \times 32/12.$$

Donde: O_2 total= liberación de oxígeno (kg/año)

Peso atómico de oxígeno = 32.

Peso atómico carbono= 12.

7.4.3 Remoción de contaminantes

De acuerdo con (Nowak et al., 2006) la cuantificación se realizó con base en la deposición seca de los contaminantes.

El flujo de contaminantes se calculó con la fórmula

$$F = Vd \times C$$

Donde: Vd= Velocidad de deposición (ms^{-1})

C= Constante de contaminación (gm^{-3})

F= Flujo de contaminantes ($gm^{-2}h^{-1}$)

Los cálculos de eliminación de contaminantes se derivaron de la resistencia del dosel de los árboles (Baldocchi et al., 1987).

$$Vd = \frac{1}{Ra+Rb+Rc}$$

Donde: V_d= Velocidad de deposición (ms^{-1})

R_a= Resistencia aerodinámica (sm^{-1})

R_b= Resistencia de la capa límite cuasi-laminar para un tipo de contaminación (sm^{-1})

R_c= Resistencia del dosel (sm^{-1}).

Para la resistencia aerodinámica y cuasi-laminar los valores se obtienen de los datos meteorológicos, y para la obtención de la resistencia del dosel se usan el modelamiento de deposición de hoja grande y copa de múltiples capas (Nowak et al., 2006).

8| Resultados y discusión

Se registraron un total de 652 árboles, distribuidos en 10 especies (tabla 4). La especie dominante *es Pinus leiophylla* con 277 árboles.

Tabla 4 Diversidad del PNCA del año 2024.

Especie.	Número de ejemplares.
Quercus ilex	6
Abies religiosa	159
Pinus patula	35
Pinus cembriodes	23
Pinus teocote	56
Pinus hartwegii	66
Pinus leiophylla	277
Pinus maximartinezii	4
Pinus montezumae	20
Cupressus lusitanica	6
TOTAL	**652**

La diversidad arbórea cambio entre los años 1996-2024, a causa de la contaminación del aire, tala, plagas e incendios (figura 14).

Figura 14 Tocones, resultado de la tala en el PNCA en el año 2024.

Prueba de lo anterior es que para el año 1996 se tienen los siguientes registros (tabla 5).

Tabla 5 Diversidad del PNCA del año 1996.

Especie	Número de ejemplares
Pinus teocote	1,656
Pinus ponderosa	99
Pinus hartwegii	124
Abies religiosa	618
Pinus cembroides	99
Total	**2,596,**

La especie dominante fue *Pinus teocote*, seguido de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* según el muestreo de 1996 publicado en 2019. La disminución de *Abies religiosa* en el año 2024 se atribuye a su susceptibilidad a la tala ya que es empleada para la elaboración de papel (Vargas-Márquez, 1997). Por su parte *Pinus teocote* fue sustituida como especie dominante por *Pinus leiophylla* en el año 2024, debido a su rango de distribución altitudinal (preferente 2,200-2,750 msnm) según ficha técnica de

CONAFOR, sin embargo, el muestreo del 12 de febrero de 2024 (Anexo 3) se tienen registros a una altitud de 3,800 msnm, además es capaz de tolerar temperaturas de entre -15 °C y 38°C y prefiere los suelos de origen volcánico por su buen drenaje debido a que son altamente porosos lo que les permite que el agua se infiltre fácilmente.

8.1 Secuestro y almacén de carbono

El secuestro total de C en el PNCA para el año 2024 fue de 993.6 kg/año y se almaceno 96,932 kg, (figura 15). En el año 1996 se secuestraron 4,600 kg/año de C y se almacenaron 264,700 kg por 2,259 árboles según el muestreo de 1996 publicado en 2019, ambos valores están por encima de los obtenidos en el año 2024 con 652 árboles. Lo anterior se debe a que en 2024 se muestrearon menos árboles que en 1996 lo que se traduce en una menor cantidad de follaje receptor de CO_2.

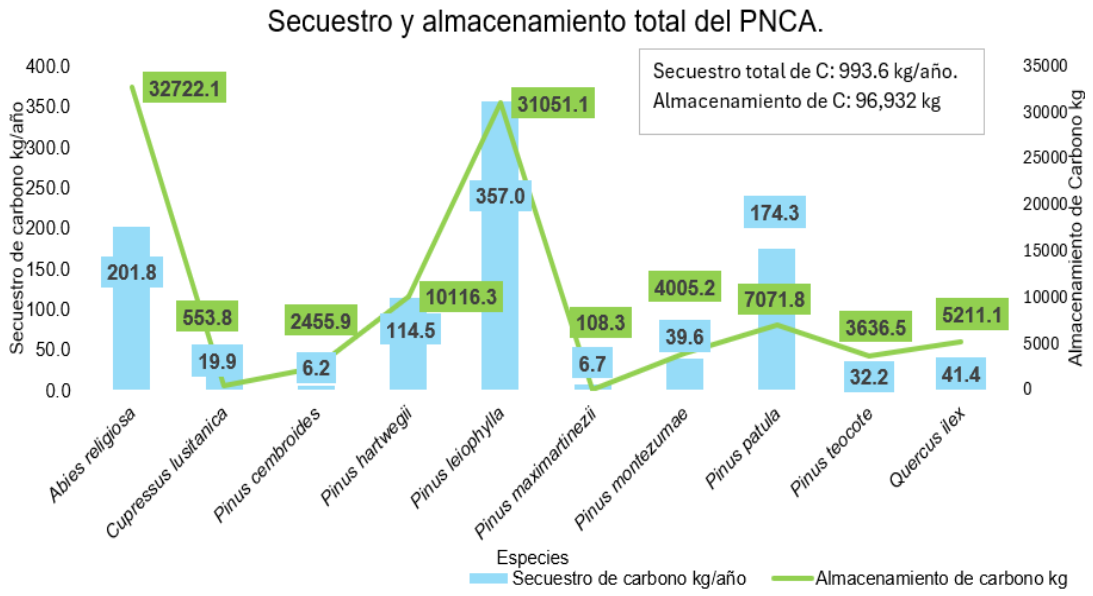


Figura 15 Secuestro y almacén de carbono total en el PNCA (Autoría).

Para el año 2024 *Pinus leiophylla* secuestró 375 kg/año de C, seguido de *Abies religiosa* quien secuestró 201.8 kg/año (figura 15). Rodríguez (2013) reportó que los

árboles jóvenes capturan más carbono, debido a que su crecimiento acelerado por lo tanto necesita capturar una mayor cantidad de carbono y emplearlo en su propio desarrollo (fase de expansión de troncos, ramas y hojas) por lo tanto hay mayor intercambio de gases ya que sus hojas son más activas. Tal es el caso de *Pinus leiophylla* el 55.2% de sus árboles se encuentra en etapa juvenil (figura 16) (Anexo 6).

Figura 16 Pinos en etapa de vida brinzal-juvenil Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024).

Otro factor determinante es el número de individuos por especie, pues a mayor cantidad de árboles aumentara la cantidad de follaje receptor de CO_2, en este caso *Pinus leiophylla* registro 277 arboles en contraste con *Abies religiosa* que solo registro 159 árboles (tabla 4). Lo anterior se atribuye a que *Abies religiosa* es susceptible a la tala por que su madera contiene altos niveles de celulosa, lo cual es implementada en la elaboración de papel (Vargas-Márquez, 1997), esta acción es posible debido a que el PNCA carece de un manejo forestal adecuado.

Considerando los resultados de mi investigación y contrastados con la publicación de PAOT (2010), se estimó la captura de carbono (promedio) para el bosque de oyamel y pino, los resultados indicaron 93,420 kg/año, y 46,960 kg/año respectivamente, estos valores están por encima de los reportados en el PNCA 2024 debido a que se considera todo el bosque ubicado en las alcaldías Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Tlalpan, Tláhuac y Milpa alta por lo tanto el número de árboles muestreados es mayor que el muestreo del Ajusco.

Con relación al almacén de C Almeida-Leñero y colaboradores (2007) reportaron que *Abies religiosa* almacena más C en comparación con *Pinus hartwegii,* con valores de 83,603,000 kg/año y 44,564,000 kg/año respectivamente, sin embargo, no se precisa el número de árboles. Similar a lo encontrado en el PNCA, *Abies religiosa* almacena más C (32,722 kg) que todas las especies de pinos (figura 15).

Rodríguez, (2013) concluyo que los árboles maduros estabilizan su velocidad de crecimiento, por lo tanto, la captura de carbono se disminuye ya que el árbol solo debe capturar la cantidad necesaria de CO_2 para su propia respiración. Al envejecer los árboles su metabolismo se vuelve lento por lo tanto son excelentes almacenadores de C a diferencia de bosques jóvenes, donde el carbono entra y sale constantemente debido al crecimiento acelerado. En el Ajusco se registraron 43.4% de árboles de *Abies religiosa* en etapa adulta (Anexo 6).

Ordoñez (1999) reporto, que la captura de CO_2, participa en la composición de estructuras del follaje, ramas, raíces y fuste. Conforme va creciendo incrementa su dosel y tronco (altura y grosor): debido a que la fotosíntesis aumenta la producción de glucosa esta es almacena en los tejidos de las estructuras mencionadas. El

almacenamiento de carbono es mayor en el fuste, ramas y raíces dado que estas estructuras poseen más lignina que las hojas (Rojas., 2014).

Considerando el total de árboles muestreados (652 árboles) el mayor registro en secuestro y almacén de C fue para *Quercus ilex* con 24.4 kg/año (figura 17) y 4,224.3 kg (figura 18), respectivamente.

Dado que es longeva (500-700 años), según Pardo de Santayana et al., (2014) en consecuencia posee una mayor biomasa acumulada (estructuras grandes y complejas) donde se puede almacenar mayor cantidad de carbono. El almacén de carbono se ve reflejado en el aumento del grosor de DN (Ordóñez y Masera, 2001), la madera de estos árboles es más densa.

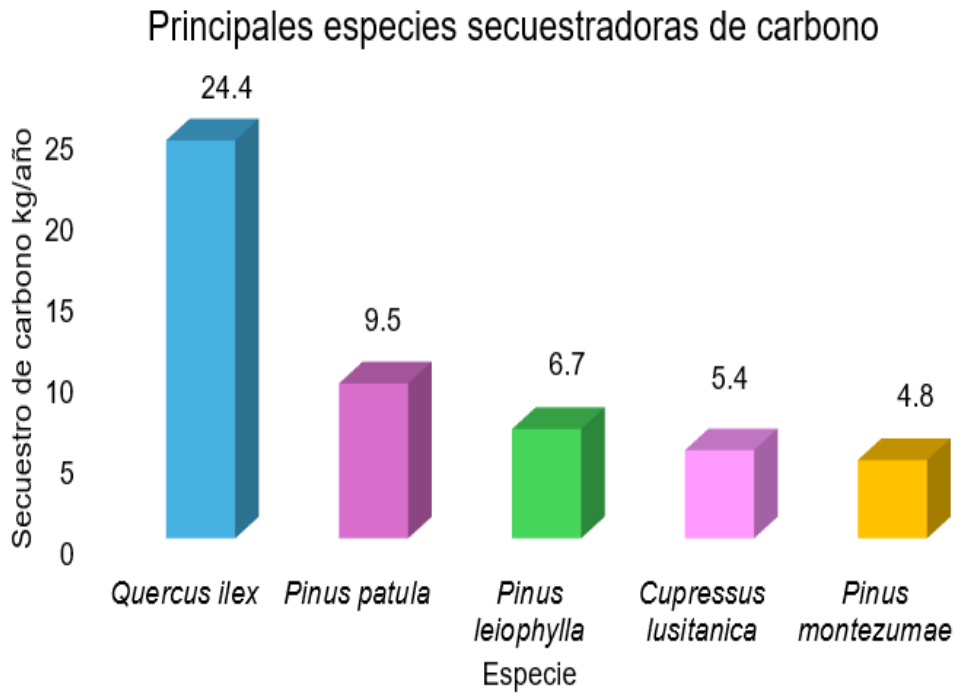


Figura 17 Principales árboles secuestradores de carbono en el PNCA (Autoría).

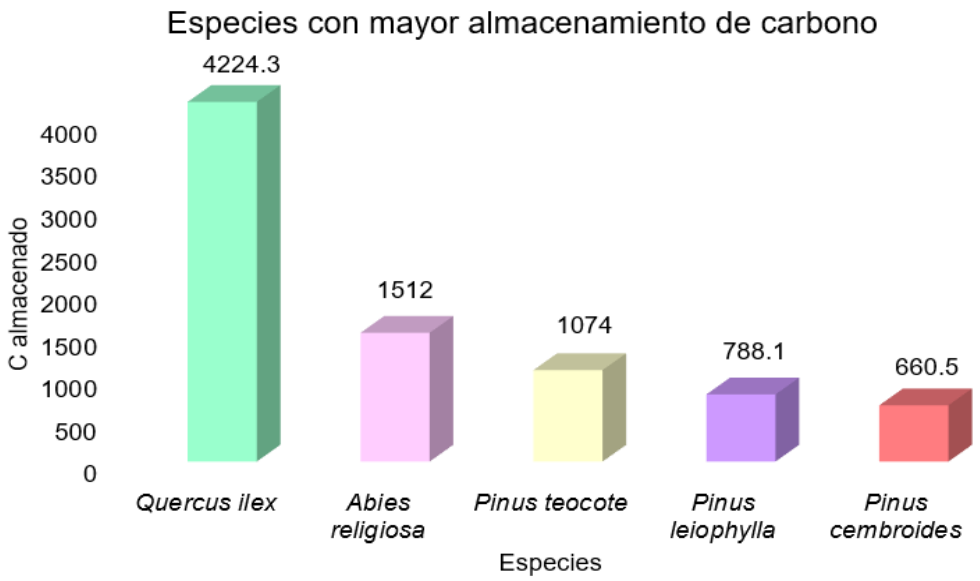


Figura 18 Principales arboles con mayor almacén de carbono en el PNCA (Autoría).

El carbono almacenado en la biomasa es crucial para la mitigación del cambio climático. Pues la biomasa de los árboles actúa como un sumidero de carbono, ayudando a reducir la cantidad de CO_2 en la atmósfera. Además, la biomasa es una fuente importante de energía renovable y puede ser utilizada para producir biocombustibles

8.2 Producción de oxígeno.

La producción de O_2 en el PNCA para el año 2024 fue mayor en *Pinus leiophylla* 952.4 kg/año (figura 19) dado que Nowak et al (2007) reportaron que depende de factores como: DN, número de arboles y condición de copa. Por lo tanto, al ser la especie dominante producirá más oxígeno.

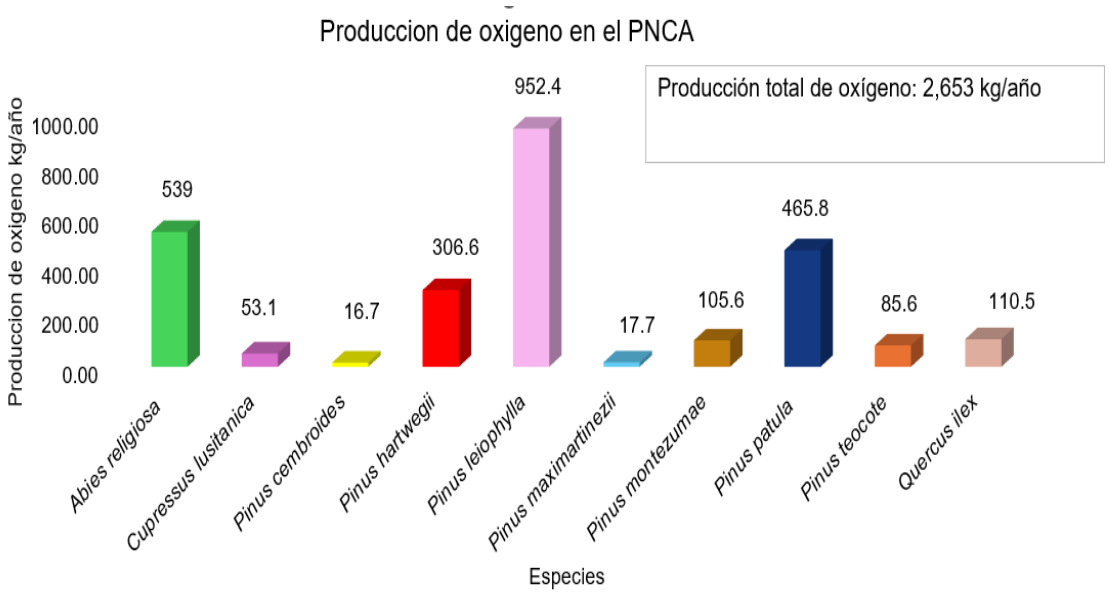


Figura 19 Producción de oxígeno total en el PNCA (Autoría).

Comparando los resultados obtenidos de producción de oxígeno de las especies que se comparten entre ambos años 2024 y 1996, se encontró lo siguiente (tabla 6).

Tabla 6 Comparación de la producción de oxígeno en el PNCA para los años 1996 y 2024.

Especie	Producción de oxígeno kg 1996 (n=2,259)	Producción de oxígeno kg 2024 (n=652)
Abies religiosa	-1,709.45	539
Pinus hartwegii	-297.94	306.6
Pinus teocote	3,407.99	85.6
Total	-1,400.6	931.2

Para fines de explicar porque la producción de oxígeno en 1996 decayó (-1,400.6 kg) (tabla 6) es necesario considerar que todas las estructuras dañadas de los árboles de tres especies en común a causa de la contaminación tuvieron que reponerse eso explica el signo negativo. Por ejemplo, en 1996 *Abies religiosa* producía -1,709.45 kg de oxígeno y en el año 2024 producía 539 kg de oxígeno. El comportamiento se replica

para *Pinus hartwegii* en el año 1996 hay un déficit de -297.94 kg de oxígeno y en el año 2024 se registró una producción de 306.6 kg de oxígeno.

Por el contrario, *Pinus teocote* contrarresta el déficit de oxígeno de 1996 (-1,406), dado que es 2.5 veces más porcentual en la producción de oxígeno.

En el año 2024 la producción de oxígeno es de 931.2 kg de oxígeno ya que con el paso de 28 años el bosque tuvo la oportunidad de recuperarse. Por ejemplo, *Abies religiosa* paso de producir -1,709.45 kg de oxígeno a 539kg lo mismo ocurrió con *Pinus hartwegii*.

Considerando los 6 *Quercus ilex* de 652 árboles muestreados en el 2024 es el árbol que más produce oxígeno 65.2 kg/año (figura 20) dado que posee un diámetro superior (92 cm) al del resto de los árboles que también destacan en esta categoría lo anterior es confirmado por Nowak et al (2007).

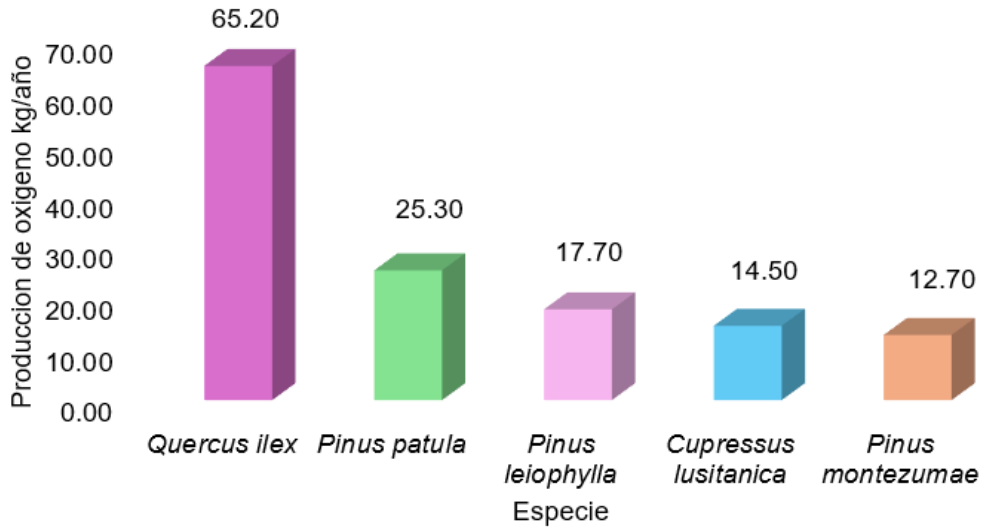


Figura 20 Principales árboles productores de oxígeno en el PNCA (Autoría).

Existen datos de producción de oxígeno menores a los obtenidos en el Ajusco, tal es el caso de Ruiz (2024) menciona que en los bosques de América del Norte se

producen 50 kg de oxígeno por árbol al año. Con respecto a *Abies alba* (abeto blanco) en Europa se genera entre 30-40 kg de oxígeno por árbol al año, este valor también está por debajo del reportado por *Abies religiosa* en el Ajusco. Dado que las estimaciones pueden cambiar según factores como: densidad del bosque, salud de copa y etapa de desarrollo de los árboles.

Los pinos son bastante eficientes en la producción de oxígeno, por ejemplo, *Pinus halepensis* (pino carrasco) puede producir alrededor de 260 kg/año de oxígeno, pero hay especies que los superan, ya que, Acosta (2020) reporto que *Paulownia tormentosa* (árbol kiri) es uno de los más eficientes, produce hasta 10 veces más oxígeno que otras especies, es capaz de producir 6 kg de oxígeno diarios (2,214 kg/año). Este valor esta por encima del reportado por *Pinus leiophylla* (952.4 kg/año) y *Pinus halepensis* (260 kg/año). En general, los pinos son muy útiles en la producción de oxígeno, pero especies como el *Paulownia tormentosa* (kiri) destacan por su capacidad excepcional para absorber CO_2 y producir O_2.

8.3 Eliminación de contaminantes

La eliminación total de (O_3, NO_2, SO_2, $PM_{2.5}$ y PM_{10}) en el PNCA para el año 2024 fue de 148 kg/ año (figura 21), la mayor remoción fue por parte de *Pinus leiophylla*, seguido de *Abies religiosa* con 51.12 kg/año y 39.02 kg/año respectivamente. El resultado es menor que en el año 1996 según el muestreo de 1996, con 264,700 kg/año debido a que es este año se muestrearon más árboles que en el año 2024.

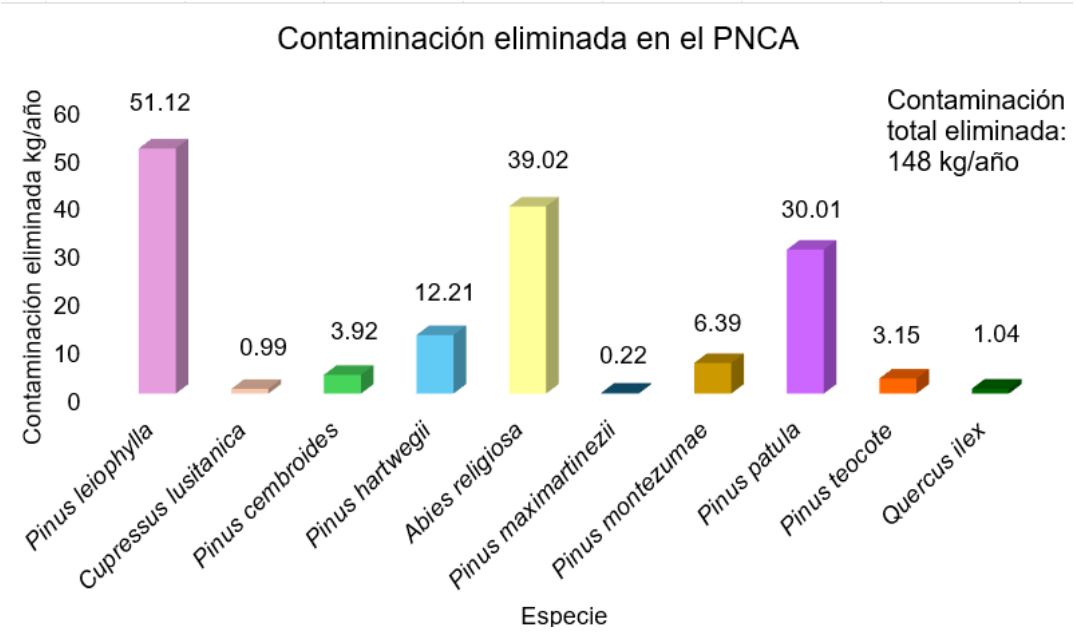


Figura 21 Remoción de contaminantes total en el PNCA (Autoría).

La remoción de contaminantes depende de varios factores como: concentración de contaminantes en el aire, número de árboles entre otros (Arroyave-Maya et al., 2019). La concentración de contaminantes en el aire en el PNCA es de 56 ton/año, según la SEDEMA (2008) (figura 22), además Alvarado y colaboradores (1993) reportaron que los bosques más contaminados son los que se ubican en el barlovento de la CDMX. Lo anterior contribuye al deterioro de la salud del bosque. Evidencia de esto es que en el año 2024 se registró el 33% de copas en estado crítico (Anexo 7), las especies con peor condición de copa son *Pinus teocote* y *Pinus cembriodes* con el 69% y 73% respectivamente de copas en la categoría muriendo.

Figura 22 Contaminación de la CDMX Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024).

Nowak (2020) menciona que la remoción de contaminantes va a ser mayor en árboles sanos, en este caso de las tres especies con mayor aporte (figura 22) *Pinus patula* a pesar de ocupar el quinto lugar en abundancia (tabla 4), cuenta con el 51% de sus copas en la categoría de aceptable (anexo 7). Lo anterior evidencia la importancia de mantener el ecosistema boscoso con buena salud, cosa que no ocurre en el PNCA (figura 23) y (figura 24). Pues mientras más sanas estén las copas habrá más superficie de contacto con las contaminantes y por lo tanto se aumenta la posibilidad de remover contaminantes del aire.

Figura 23 Árboles de Pinus con copas pobres, presencia de neblina y ramas y troncos talados Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2024).

Figura 24 Paraje "Valle del Tezontle Ajusco" ejemplo de falta de abundancia y biomasa arbórea Tomada de (Laboratorio de Contaminación Atmosférica, 2018).

La emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs), contribuye al aumento de la concentración de contaminantes en el aire ya que estos son precursores de la formación de ozono.

Tomando en cuenta la liberación de COVs *Cupressus lusitanica* se posiciona como la especie que emite menos COVs 0.3 kg/año (Anexo 8), por lo tanto, se

considera una buena opción para contribuir con la disminución de concentración de contaminantes en el aire.

La figura 25 muestra los cinco árboles que remueven más contaminantes, todas las especies son perennes, característica que les permite estar activas todo el año, a diferencia de los árboles caducifolios que pierden sus hojas en el invierno, donde la concentración de contaminantes en el aire aumenta (Pleijel et al., 2022).

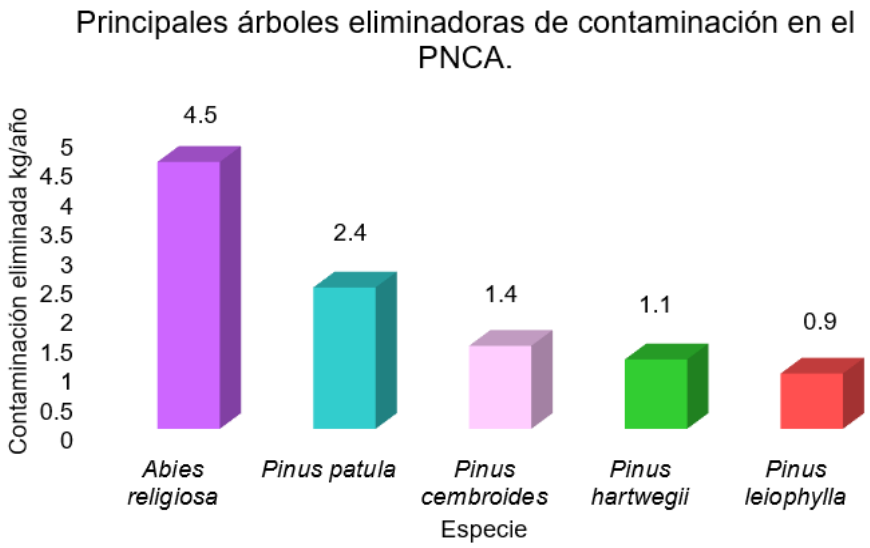


Figura 25 Principales árboles eliminadores de contaminación en el PNCA (Autoría).

La remoción de contaminantes contribuye significativamente en la mejor de la calidad de aire, y por lo tanto a la salud de los asentamientos aledaños a los bosques.

9| Conclusiones

Según el análisis de los SEP en el Ajusco las especies con mayor aporte en orden decreciente son: *Pinus leiophylla*, *Abies religiosa* y *Pinus patula*.

En el secuestro y almacén de carbono no se comparte la misma especie en relevancia, pues *Pinus leiophylla* secuestra más carbono debido a su dominancia y a su etapa juvenil, por su parte *Abies religiosa* almacenó más carbono, dado que tiene mayor cantidad de árboles en etapa adulta.

Pinus leiophylla es la especie con mayor producción de oxígeno ya que destaca como la especie dominante, además de estar en etapa juvenil.

En eliminación de contaminantes, las especies de mayor relevancia fueron *Pinus leiophylla, Abies religiosa* y *Pinus patula,* lo anterior se atribuye a que las tres especies son perennes.

Las evidencias fotográficas y resultados numéricos obtenidos en el presente trabajo evidencian la importancia de generar un plan de manejo para el Ajusco ya que proporciona cantidades importantes de SEP, las cuales pueden aumentar implementando estrategias que enriquezcan la zona y la conserven.

10|Sugerencias

De acuerdo con las distribuciones altitudinales se sugiere incrementar la cantidad de *Pinus leiophylla, Abies religiosa y Pinus hartwegii* en la zona más rala del polígono, que es a partir de los 3,200 msnm ya que estas especies se distribuyen por encima de los 3,000 msnm, por su parte la zona de amortiguamiento se puede reforestar con *Pinus Patula*.

Tabla 7 Lista de especies recomendadas para reforestación en el PNCA.

Especie	Descripción	Importancia
Pinus leiophylla (ocote chino)	Su distribución altitudinal es desde 1,900-3,300 msnm según ficha técnica de (CONAFOR)	Potencial para recuperar suelos erosionados según ficha técnica de (CONAFOR)
Abies religiosa (oyamel)	Su distribución altitudinal va de los 2,800-3,500 msnm por ello es resistente a temperaturas frías según ficha técnica de (CONAFOR).	Captura de carbono y formación de suelos según ficha técnica de (CONANP, 2014a).
Pinus patula (pino llorón)	Su distribución altitudinal va de los 1,800-2,400 msnm según ficha técnica de (CONAFOR).	Se adapta a suelos no forestales según ficha técnica de (CONAFOR).
Pinus hartwegii (Ocote blanco)	Su distribución altitudinal va de los 2,500-4,300 msnm según ficha técnica de (CONANP, 2014b).	Formación de suelos y captura de carbono según ficha técnica de (CONANP, 2014b)

11| Referencias

1. Acosta, M. B. (2020). Árboles que producen más oxígeno. Ecologiaverde.com; Ecologiaverde.com. https://www.ecologiaverde.com/arboles-que-producen-mas-oxigeno-2873.html
2. Air Pollution Removal by Urban Forests (U.S. National Park Service). (2017). Translate.goog. https://www-nps-gov.translate.goog/articles/000/uerla-trees-air-pollution.htm?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
3. Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., Ordoñez, MJ y Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 53-64. Cómo citar - Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México
4. Alvarado, D., de Bauer, L. y Galindo A. (1993). DECLINE OF SACRED FIR (Abies Religiosa) IN A FOREST PARK SOUTH OF MEXICO CITY. *Environmental Pollution*, 80, 115-121 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026974919390136C
5. Alvarado-Rosales, D., Luz, Hernández-Tejeda, T., Cox, R. W., y Malcolm, J. W. (2017). Concentraciones in situ de ozono en bosques de la Cuenca de México e influencia de la altitud. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,8*(44), 29–54. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322017000600029
6. Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm10. *Luna Azul*, *34*, 195–213. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012
7. Arrebola, J., Fernández, A. y León, J. (2004). Aspectos sanitarios de los óxidos de azufre como contaminantes atmosféricos. *Higiene Y Sanidad Ambiental*, 4, 106–113.

https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc5101574039cd9_Hig.Sanid_.Ambient.4.106-113%282004%29.pdf

8. Arroyave-Maya, M., Posada-Posada, M., Nowak, D. y Hoehn, R. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal, 22*(1), 5-16. http://dx.doi.org/10.14483/2256201X.13695
9. Atlas Weather. (2025). Anual y Mensual del Tiempo - San Miguel Ajusco, México. Weather Atlas. https://www.weather-atlas.com/es/mexico/san-miguel-ajusco-clima
10. Baldocchi, D., Chu, H., y Reichstein, M. (2018). Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: *A review. Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 520–533. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.015
11. Baldocchi, D., Hicks, B. y Cámara, P. (1987). A canopy stomatal resistence model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment, 21* (1), 91-101. https://nature.berkeley.edu/biometlab/pdf/ddb%201987%20atmos%20environ.pdf
12. Bueno-López, S. W., García-Lucas, E., & Caraballo-Rojas, L. R. (2019). Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of Pinus occidentalis trees. Madera Y Bosques, 25(3). https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531868
13. Calderón, F. (2009). El Ajusco casi completamente deforestado, contaminado, urbanizado y privatizado. Entrevistado por periodista https://doi.org.diversidadambiental.org/medios/nota160.html
14. Camacho-Valdéz, V., y Ruiz-Luna, A. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Bio Ciencias, 1* (4), 3-15 https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/19/17
15. Ciesla, W. M. (1996). Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto. FAO. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=DzoW7rZmY5QC&oi=fnd&pg=PR11&dq

=cambio+clim%C3%A1tico+y+bosques&ots=8nEAA9rvxp&sig=vNXJ5q3LEr_KZVS76RyX0x-2t-g#v=onepage&q=cambio%20clim%C3%A1tico%20y%20bosques&f=false

16. CONAFOR. (2012). Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo 2012. https://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodologicos/2012/Manual_remuestreo_2012.pdf
17. CONAFOR. (2022). Se reduce en 26%la tasa anual de deforestación. Gob.mx. https://www.gob.mx/conafor/prensa/se-reduce-en-26-la-tasa-anual-de-deforestacion#:~:text=Con%20base%20a%20la%20metodolog%C3%ADa,(66.65%20millones%20de%20hect%C3%A1reas).
18. CONAFOR. (s.f). Ficha técnica de Abies religiosa (Kunth Schltdl. et Cham.) http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873abies%20religiosa.pdf
19. CONAFOR. (s.f). Ficha técnica de Pinus patula Schl. et Cham http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975pinus%20patula.pdf
20. CONAFOR. (s.f). Pinus leiophylla Schl. & Cham. http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/967Pinus%20leiophylla.pdf
21. CONANP. (2014b). Ficha de identificación Pinus hartwegii (LINDL). https://conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/fichas_de_especies/Pinus_harwegii.pdf
22. CONANP. (2014a). Ficha de identificación Abies religiosa (Kunth Schltdl. et Cham.). https://conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/fichas_de_especies/Abies_religiosa.pdf
23. Corona, G. (2024). Evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el bosque urbano de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] http://132.248.9.195/ptd2024/jul_sep/0862588/Index.html

24. Escobar-Alonso., S. y Rodríguez-Trejo, D. (2021). Pinus leiophylla Schiede ex Schlechtendal & Chamisso (Pinaceae) en D. Rodríguez-Trejo (Ed), *Semillas de especies forestales* (pp.256-260). División de Ciencias Forestales, UACH. https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2021/04/Semillas-de-Especies-Forestales-DART-Dicifo-UACH-1.pdf
25. Fenn, M.E, De Bauer De, L. y Hernández-Tejeda, T. (2002). Summary of Air pollution impacts on forests in the Mexico City Air Basin. *Ecological studies, 156*, 337-355. https://doi.org/10.1007/978-0-387-22520-3_15
26. Gómez, B. (2022). Cámaras experimentales y su aporte al estudio del efecto de la contaminación del aire en la fisiología de árboles urbanos: un estado del arte. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] http://132.248.9.195/ptd2023/noviembre/0850053/Index.html
27. González-Hernández, J., Romo-Lozano, D., Cristóbal-Acevedo, M.A., Martínez, D., y Leopoldo Mohedano, C. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y Bosques, 29* (3), 1-16. doi: 10.21829/myb.2023.2932588
28. Granados-Sánchez, D., López Ríos, G. F. y Hernández García M. Á. (2010). LA LLUVIA ÁCIDA Y LOS ECOSISTEMAS FORESTALES. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente, XVI* (2), 187–206. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022
29. Hernández Figueroa, E. (1994). Importancia de la conservación del “Parque Nacional Cumbres del Ajusco”. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/S6SBQHBAMADMRDC9JSKU8AC9PXV4YEGHYIB1QIES2CK4E827SB-13425?func=full-set-set&set_number=043391&set_entry=000005&format=999

30. I-tree tolos. (2015). Adaptación del programa i-tree Eco a México. https://www.itreetools.org/documents/212/iTree_Eco_Mexico_Adaptation_Description_15Sep2018.pdf
31. Jiménez-Cruz, D. (2011). Restauración del servicio ambiental hidrológico de una pradera de alta montaña en el Parque Nacional Cumbres del Ajusco, D.F. México. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000679151/3/0679151_A1.pdf
32. Laboratorio de Contaminación Atmosférica. (2019). i-Tree Análisis del ecosistema AjuscoEco. (pp 1-38).
33. Malpartida-Pérez, A.G. (2021). Rol del arbolado urbano sobre la captura de monóxido de carbono mediante el Software i-Tree en el parque Santa Domingo, Carabayllo 2021. [Tesis de licenciatura, Universidad Cesar Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/91862/Malpartida_PAG-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
34. Nowak, D. J., Crane, D. E., y Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States.*Urban Forestry & Urban Greening*,*4*(3-4), 115–123. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007
35. Nowak, D.J., Hoehn, R. y Crane, D. E. (2007). Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry, 33*(3), 220–226. https://doi.org/10.48044/jauf.2007.026
36. Ordóñez., J. y Masera., O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Redalyc. 7*(1),3-12. https://www.redalyc.org/pdf/617/61770102.pdf
37. OurWorldinData. (2024). Biomasa forestal aérea. https://ourworldindata.org/grapher/above-ground-biomass-in-forest-per-hectare.

38. PAOT. (2010). Cuantificación del carbono en la vegetación del suelo de conservación del distrito federal.

39. Pardo de Santayana, M., Morales, R., Aceituno-Mata, L. y Molina, María. (2014). INVENTARIO ESPAÑOL DE LOS CONOCIMIENTOS TRADICIONALES RELATIVOS A LA BIODIVERSIDAD. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. https://conecte.es/media/com_concibe/files/Quercus%20ilex.pdf

40. Pleijel, H., Klingberg, J., Strandberg, B., Sjoman, H., Tarvainen, L. y Wallin, G. (2022). Differences in accumulation of polycyclic aromatic compounds (PACs) among eleven broadleaved and conifer tree species. Ecological Indicators, 145, 1-13. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22011542

41. Redacción adn40. (2021). Incendio forestal en el Ajusco deja más de 13 hectáreas afectadas. ADN 40. https://www.adn40.mx/ciudad/nota/notas/2021-02-03-14-45/incendio-forestal-en-el-ajusco-deja-mas-de-13-hectareas-afectadas?form=MG0AV3

42. Ribas, À., Josep Peñuelas, Elvira, S., y Gimeno, B. S. (2004). Ozone exposure induces the activation of leaf senescence-related processes and morphological and growth changes in seedlings of Mediterranean tree species. *Environmental Pollution, 134*(2), 291–300. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.07.026

43. Rico, R. (2021). Aproximación a los servicios ecosistémicos en la comunidad de San Pedro Atlapulco, Ocoyoacac, Estado de México. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] http://132.248.9.195/ptd2021/julio/0813605/Index.html

44. Ríos., M, Aguirre., A, López., B. y Calleja., B. (2019). Producción de oxígeno en Pinus teocote Schl. et Cham. y Pinus oocarpa Schiede. En la región Montaña del estado de Guerrero, México. Iberoamericana de las Ciencias *Biológicas y Agropecuarias, 8*(15), 1-20. file: http://C:/Users/estef/Downloads/83-Texto%20del% 20art%C3%83_culo-806-2-10-20190206.pdf.

45. Rodríguez, V. (2013). Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K). Schl. *et* Cham. Del paraje el Cedral del Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

46. Ruiz, M. (2024). Conoce los árboles y plantas que producen más oxígeno y purifican el aire. Bio Space. https://www.biospace.es/arboles-que-producen-mas-oxigeno/

47. Saavedra-Díaz, Z. M., y Perevochtchikova, M. (2017). Evaluación ambiental integrada de áreas inscritas en el programa federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio: Ajusco, México. *Investigaciones Geográficas*, (93), 1-15. https://doi.org/10.14350/rig.5643.

48. Sanmartín, E. F. (2015). Árboles urbanos. *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*, (17),101-109.file:///C:/Users/estef/Downloads/Dialnet-ArbolesUrbanos-6424500.pdf

49. SEDEMA. (2020) Reporte de incendio forestal en el área del suelo de conservación. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/reporta-sedema-disminucion-de-incendios-forestales-y-reduccion-de-superficie-afectada-en-suelo-deconservacion#:~:text=La%20pronta%20respuesta%20y%20capacitaci%C3%B3n,afectaron%204%20mil%20302.05%20hect%C3%A1reas

50. SEDEMA. (2021a). Caracterización, evaluación y análisis del entorno físico y de la representatividad en las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-entornos.pdf

51. SEDEMA. (2021b). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCA/InventarioDeEmisionesZMVM2018.pdf

52. SEMARNAT. (2017). Ecosistemas costeros, los que más carbono capturan | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx.

53. UFORE (2003). The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Field Data Collection Manual (315) 448-3200. USDA Forest Service Northeastern Research Station. https://www.researchgate.net/publication/229047370_The_urban_forest_effects_UFORE_model_Field_data_collection_manual

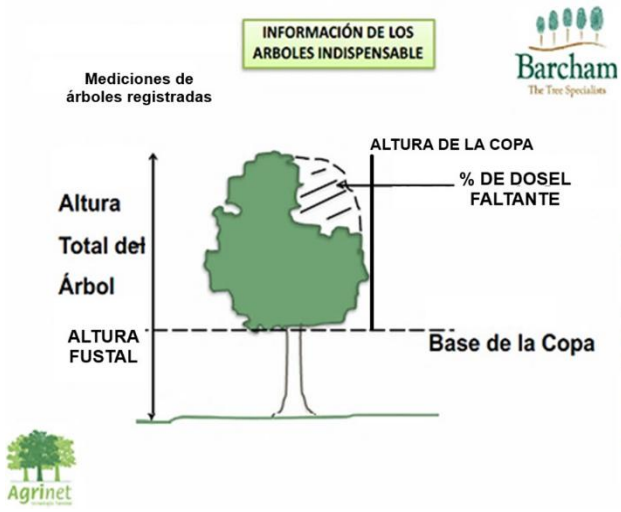
54. Vargas-Márquez, F. (1997). Parques nacionales de México y reservas equivalentes: pasado, presente y futuro. México. Instituto Nacional de Ecología.

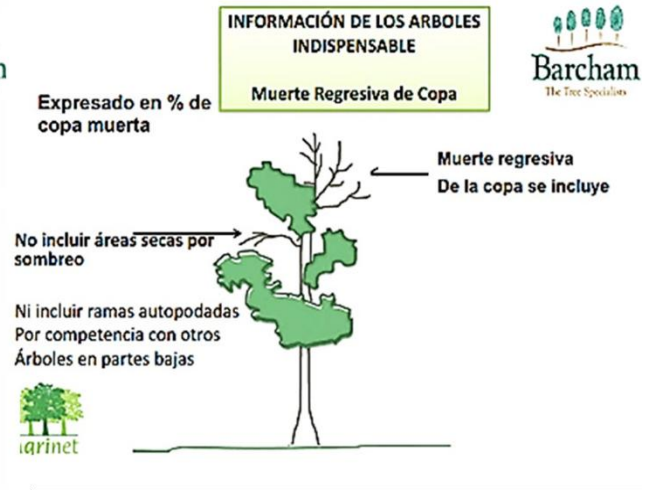
55. Vázquez, E., Pilar, del, Díaz, S. A., y J. Jesús Solís Enríquez. (2023). Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México. *Madera Y Bosques*, *29*(1), e2912460–e2912460. https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912460

56. Vorster, A.G., Evangelista, P.H. y Stovall, A.E.L. (2020). Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: the role of allometric equations. *Carbon Balance Manage* 15, (8) https://doi.org/10.1186/s13021-020-001

Anexos.

Anexo 1 Criterios visuales de registro dendrométricos, I tree Eco (Barcham, 2020).





Anexo 2. Formato de registro de datos dendrométricos (Autoría, 2024)

FORMATO ARBOLADO

FECHA:
REALIZO:

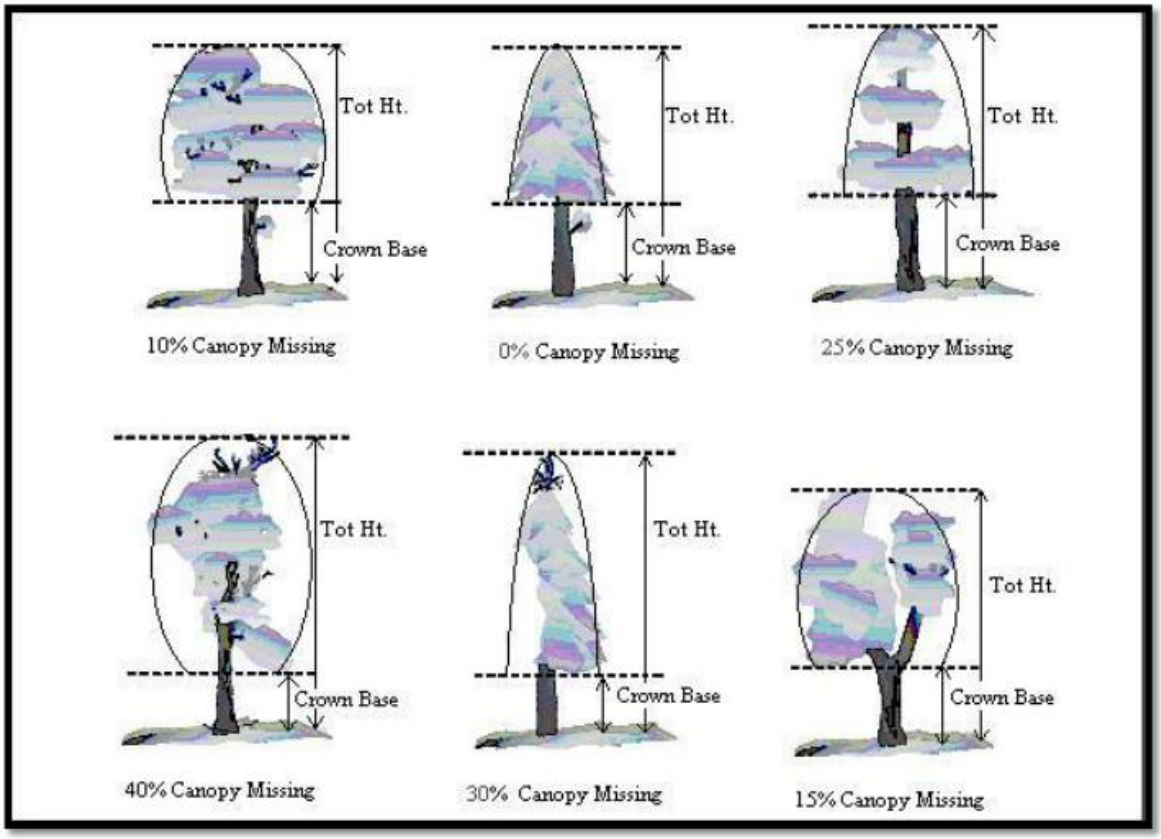
COORDENADAS:
O3: CO: NO2: SO2: PM10: PM2.5:

No. Arbol	Especie	DAP	% Muerte	Altura	Altura superior	Altura base	N-S	E-W	% Copa faltante	Coordenadas/comentarios

Anexo 3 Coordenadas y fecha de muestreos en el PNCA.

Fecha de muestreo	Coordenadas
16 de Octubre 2023	19°13’25” N,-99°16’1” O
23 de Octubre 2023	19°13’35” N, -99°16’14” O
19 de Febrero 2024	19°13’22” N, -99°16’19” O
26 de Febrero 2024	19°13’15” N, -99°16’26” O
04 de Marzo 2024	19°12’58” N, -99°16’14” O

Anexo 4. Copa faltante, UFORE (2003).



Anexo 5. Ecuaciones para el cálculo de carbono por especie (PAOT, 2010).

Especie	Ecuaciones
Abies religiosa	C= 0.033*($DN^{2.51}$)
Pinus montezumae	C= 0.006*($DN^{3.038}$)
Pinus hartwegii	C= 0.0515*($DN^{2.2659}$)
Pinus patula	C=0.021*($DN^{2.645}$)
Quercus sp	C= (EXP(-2.27+2.39*LN(DN)))*0.5
Cupressus lusitanica	C=(EXP(-9.5382+1.74008*LN(DN)+1.0481*LN(A)))*1.1*0.7*0.5*1000
Pinus leiophylla	C=(EXP(-10.34881812+2.02143823*LN(DN)+1.03958842*LN(A)))*1.1*0.5*1000
Pinus teocote	C=(EXP(-9.99696596+1.91126433*LN(DN)+1.05268932*LN(A)))*1.1*0.49*0.5*1000

Donde: C= Carbono (kg)
DN= Diámetro normal (cm)
LN= Logaritmo natural
0.5= Transformar la biomasa a carbono
A= Altura total (metros)
EXP= Función exponencial
1000= Transformar el valor de carbono a kilogramos
1.1= Incluye el follaje de coníferas; además de la densidad de la madera (ton/m^3) por especie.

Anexo 6. Tablas de etapa de ciclo de vida de las especies dominantes

Abies religiosa

DAP	Etapa ciclo de vida	Porcentaje de árboles
Menor a 10 cm	Brinzal	17.6%
10-30 cm	Juvenil	36.5%
30-70 cm	Adulto	43.4%
Mayor a 70 cm	Senil	0%

Pinus leiophylla

DAP	Etapa ciclo de vida	Porcentaje de árboles
Menor a 10 cm	Brinzal	19.1%
10- 40 cm	Juvenil	55.2%
20-40 cm	Adulto	23.5%
Mayor a 40 cm	Senil	2.2%

Anexo 7. Tabla de salud de copa de los arboles sensados

Copa							
Especie	Excelente %	Buena %	Aceptable %	Mala %	Critica %	Muriendo %	Muerto%
Abies religiosa		3.8	11.3	20.1	45.9	18.9	
Pinus hartwegii		10.6	24.2	34.8	24.2	6.1	
Pinus leiophylla	0.4	3.6	10.5	35.4	38.6	11.6	
Pinus maximartinezii	100						
Pinus montezumae			5	35	35	25	
Pinus patula		20	51.4	20	8.6		
Pinus teocote				7.1	23.2	69.6	
Quercus ilex			57.1		28.6	14.3	
Cupressus lusitanica		33.3	16.7	50			
Pinus cembroides			4.3	13	8.7	73.9	

Anexo 8. emisión de COVs por especie arbórea del PNCA (I-tree Eco, 2024).

Nombre de la especie	Monoterpene (kg/año)	Isoprene (kg/año)	COV totales (kg/año)
Abies religiosa	30.4	3.4	33.8
Cupressus lusitanica	0.3	0.0	0.3
Melodinus	0.0	0.0	0.0
Pinus cembroides	1.7	0.0	1.7
Pinus hartwegii	5.4	0.0	5.4
Pinus leiophylla	17.3	0.0	17.3
Pinus maximartinezii	0.1	0.0	0.1
Pinus montezumae	2.8	0.0	2.8
Pinus patula	13.3	0.0	13.3
Pinus teocote	1.4	0.0	1.4
Quercus	0.1	0.1	0.1
Quercus ilex	1.3	1.0	2.3
Quercus polymorpha	0.0	0.0	0.0
Quercus rugosa	0.3	0.2	0.4
Total	**74.5**	**4.7**	**79.2**