



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y  
REGIONAL

**Evolución de los sumideros de carbono en la  
biomasa arbórea a partir de la  
implementación de campañas de  
reforestación en el Parque Estatal Sierra  
Morelos para el periodo 1985-2012**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
PRESENTAN

**JENNIFER ARELLANO BAÑUELOS**



DIRIGIDA POR:

Dr. EN C. GUSTAVO ALVAREZ ARTEAGA

## **Contenido**

<b>Resumen</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>Planteamiento del problema</b> .....	<b>7</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>8</b>
<b>Pregunta de investigación</b> .....	<b>8</b>
<b>Hipótesis</b> .....	<b>8</b>
<b>Objetivo general</b> .....	<b>8</b>
Objetivos específicos .....	9
<b>Capítulo I Marco Teórico</b> .....	<b>10</b>
El ciclo del carbono en sistemas forestales .....	10
Medición de los almacenes de carbono en biomasa. ....	14
Definición e importancia de los servicios ambientales .....	16
La captura de carbono como servicio ambiental en los parques urbanos .....	20
La gestión de parques urbanos en el Estado de México: caso de estudio Parque Sierra Morelos.....	29
<b>Capítulo II Materiales y Métodos</b> .....	<b>37</b>
Caracterización de la zona de estudio .....	37
Ubicación.....	37
Clima .....	39
Geología .....	39
Geomorfología.....	40
Edafología .....	46
Hidrología .....	47
<b>Uso de suelo y vegetación</b> .....	<b>49</b>
Fauna .....	54
Contexto histórico y socioeconómico.....	57
<b>Metodología</b> .....	<b>59</b>
<b>Capítulo III Resultados</b> .....	<b>67</b>
Caracterización de los sitios de muestreo.....	67

Evaluación de la estructura de los sitios de estudio.....	74
Densidad arbórea .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Diámetros arbóreos promedio.....	75
Captura de carbono .....	80
Captura por año de plantación .....	80
Tasas de captura por especie en función del tiempo.....	81
<b>Capítulo IV Discusión .....</b>	<b>88</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>98</b>
<b>Índice tablas .....</b>	<b>101</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>102</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>105</b>

## **Resumen**

Los parques urbanos son áreas dinámicas que tienen múltiples beneficios para la población de las zonas urbanas, una de ellas y considerada de gran valor como una acción de mitigación contra el cambio climático es la captura de carbono. El presente trabajo se desarrolló en el Parque estatal Sierra Morelos con el objetivo de evaluar y estimar el comportamiento del carbono retenido en el arbolado del mismo en un periodo de 1985 a 2012. El trabajo se realizó tomando como guía la metodología establecida por el programa mexicano del carbono. Se llevó a cabo un inventario mediante la localización de rodales con diferentes fechas de reforestación tomando en total 7 sitios durante el periodo ya mencionado, posterior a ello se aplicaron modelos alométricos para cada especie encontrada y con base en los resultados se establecieron dos líneas tendenciales en las cuales se puede apreciar como es el comportamiento actual del carbono almacenado en la biomasa y cual sería una aproximación al comportamiento posterior con el seguimiento actual de las campañas de reforestación y forestación.

El resultado de la investigación derivó en un almacén de carbono de 51.9 Mg C/ha total por los 7 sitios muestreado con una notable correlación del almacenamiento del carbono en función a la edad de la plantación siendo el más antiguo el año 1985 con un estimado de 22.97 Mg C/ha y el más joven el año 2012 con un total de 1.49Mg C/ha, por otra parte la especie más abundante fue *Cupressus lindleyi* estando presente en todos los sitios muestreados principalmente debido al cambio de especies en las campañas de reforestación.

Dentro de la investigación se plantearon dos modelos tendenciales, por un lado, el lineal, el cual fue el más acertado para el caso de estudio debido al tipo de datos trabajados y al valor obtenido que fue de 181.49 Mg C/ha en el periodo de los 30 años posteriores, en comparación con otros autores citados en el documento este valor se acercaría un poco más a lo deseable y el potencial con un resultado un poco por debajo del anterior con un total de 173.24 Mg/ha en el mismo periodo de tiempo.

### **Palabras clave:**

Almacenamiento de carbono, Parque urbano, Servicios ambientales

## **Abstract**

Urban parks are dynamic areas that have multiple benefits for the population of cities, one of them and considered of great value as a mitigation action against climate change is carbon sequestration. The present work was developed in the Sierra Morelos State Park with the objective of evaluating and estimating the behavior of the carbon retained in tree biomass from 1985 to 2012. The work was carried out taking as a guide the methodology established by the Mexican program Carbon. An inventory was carried out by locating seven stands with different reforestation dates. Different allometric models were applied for each species found and based on the results, two trend lines in which it can be seen how the current behavior of the carbon stored in the biomass is and what would be an approximation to the subsequent behavior under the same management practices.

The result of the research resulted in a carbon store of 51.9 Mg C / ha total by the 7 sites sampled with a notable correlation of carbon storage as a function of the age of the plantation, the oldest being the year 1985 with an estimate of 22.97 Mg C / ha and the youngest in 2012 with a total of 1.49 Mg C / ha. The most abundant species was *Cupressus lindleyi* being present in all the sampled sites mainly due to the change in management practices.

Within the investigation two trend models were used in the research, on the one hand the linear model, which was the most appropriate for the case study due to the type of data used and the value obtained which was 181.49 Mg C/ha in the period of 30 years later, in comparison with other authors cited in the document this value would be a little closer to the desirable and the potential with a result a little below the previous one with a total of 173.24 Mg/ha in the same period of time.

**Keywords:** *sustainability, urban parks, indicators, environmental services*

## Introducción

De acuerdo a cifras de las Naciones Unidas, el 55% de la población mundial se concentra en ciudades y se estima que, para 2050 la población urbana llegará al 68% (ONU, 2018). Este acelerado crecimiento se debe en gran medida a la búsqueda de mejores satisfactores de vida que ofrecen las ciudades, ya que en ellas se concentra cerca del 80% de los ingresos de cada país. No obstante, las externalidades de dichos procesos socio económicos tienden a impactar los sistemas ambientales sobre los que se establecen. En tal sentido, la reducción y deterioro de los espacios verdes en las ciudades de América Latina es una constante por lo que su estudio y valoración permite identificar su condición actual y determinar probables estrategias que incrementen su capacidad para proveer de servicios ambientales de calidad a la población local. Bajo esta premisa, el objetivo principal de esta investigación consistió en determinar la evolución de los sumideros de carbono en la biomasa arbórea dentro del Parque Estatal Sierra Morelos (PESM), a partir de la implementación de campañas de reforestación comprendidos en el período 1985 – 2012.

En una primera etapa, se recurrió a diversas fuentes de consulta para caracterizar el sistema ambiental dentro del área de estudio, así como su delimitación territorial, tenencia de la tierra, conflictos políticos y territoriales que han enmarcado su proceso de gestión durante dicho periodo. Producto de esta etapa se generó cartografía digital detallada para identificar polígonos con plantaciones forestales de acuerdo a su año de intervención, con lo cual se determinaron un total de 7 rodales para su muestreo.

En campo, se tomaron registros dasométricos (DAP) con los que se estimaron los almacenes de biomasa y carbono a partir de la aplicación de modelos alométricos desarrollados para las diferentes especies arbóreas identificadas que fueron: *Cupressus lindleyi*, *Fraxinus uhdei*, *Pinus montezumae*, *Pinus patula* y *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Posteriormente se plantea un modelo matemático con el fin de determinar trayectorias de captura de carbono en biomasa aérea por cada especie, con lo que

será posible proponer escenarios a mediano y largo plazo sobre la capacidad de captura de carbono dentro del parque.

### ***Planteamiento del problema***

Siendo las ciudades el principal espacio para el poblamiento del territorio a nivel mundial, ha sido demostrada la necesidad de que los habitantes dispongan de superficies mínimas de áreas verdes, las cuales prestan diversos servicios a la sociedad. Sin embargo, las experiencias en Latinoamérica denotan un abandono histórico de los espacios verdes y una creciente reducción en la medida en que los centros urbanos crecen. En la ciudad de Toluca, México este problema se manifiesta en el déficit de áreas verdes que requiere la población y que de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), debieran disponer de un mínimo de 9 m<sup>2</sup> de espacios verdes por habitante, sugiriendo su diseño de tal manera que todos los residentes vivan cerca de un espacio abierto, a una distancia no mayor a 15 minutos a pie (Hernández *et al.*, 2018). En la zona metropolitana del Valle de Toluca se encontró que el 85% de las Áreas Geo estadísticas Básicas de la capital mexiquense no alcanzan este mínimo requerido. (Vences, 2014)

Los servicios ambientales que proporcionan los espacios verdes urbanos son múltiples, destacando la captación de agua y recarga de acuíferos, limpieza del aire, esparcimiento y captura del CO<sub>2</sub> atmosférico a través del proceso fotosintético. A pesar de que históricamente se han realizado campañas de reforestación y manejo de áreas verdes en el municipio de Toluca, existen pocos datos confiables sobre el impacto que dichas actividades han tenido sobre la provisión de servicios ambientales, particularmente sobre la captura de carbono, desconociendo por tanto el estado actual y magnitud de estos sumideros y el potencial que tendrían a mediano y largo plazo para reducir los impactos ambientales que ocasionan las actividades humanas en este espacio geográfico.

## ***Justificación***

Los parques urbanos son espacio de vital importancia dentro de las ciudades como parte de su estrategia para mitigar los efectos de su huella ecológica frente al calentamiento global y el cambio climático. Estos espacios brindan múltiples servicios ambientales, siendo uno de los más importantes la captura y almacenamiento del carbono. Se plantea que un árbol en buen estado de salud puede incorporar en promedio 3.5 kg de carbono por año; extrapolando la cifra, un área arbolada con una extensión de 2,500 m<sup>2</sup> podría absorber en un año el CO<sub>2</sub> que produce un auto al recorrer 18,000 km y al mismo tiempo proporcionar oxígeno suficiente para 52 personas (Martínez y Chacalo, 1994).

Considerando la importancia que tiene la forestación y reforestación en áreas verdes urbanas, la presente investigación contribuirá a generar información básica sobre la magnitud y tendencias de incremento de los almacenes de carbono en la biomasa arbórea del Parque Estatal Sierra Morelos, información requerida para establecer la viabilidad presente y futura de las acciones para su conservación y mejora, la cual podría ser objeto de comparación en áreas verdes con condiciones similares.

## ***Pregunta de investigación***

¿Cuál ha sido el impacto de las campañas de reforestación en el Parque Estatal Sierra Morelos sobre su capacidad de captura de carbono en la biomasa arbórea?

## ***Hipótesis***

A partir de la implementación de campañas de reforestación efectuados en el Parque Estatal Sierra Morelos, es posible establecer un modelo de incorporación de las reservas de carbono de tal forma que permita conocer la capacidad de esta área verde urbana para proporcionar servicios ambientales por captura de carbono a mediano y largo plazo.

## ***Objetivo general***

Determinar la tasa de captura de carbono en la biomasa arbórea del Parque Estatal Sierra Morelos para evaluar la función presente y futura de este parque como proveedor de servicios ambientales para la zona metropolitana de Toluca, México.



## Objetivos específicos

1. Documentar el contexto socioeconómico relacionado con el manejo ambiental del Parque Estatal Sierra Morelos durante el periodo 1985-2012
2. Establecer una línea base para la captura de carbono en los almacenes de biomasa arbórea a partir de las acciones de reforestación durante dicho periodo.
3. Generar modelos de captura de carbono en biomasa arbórea a corto, mediano y largo plazo.

## **Capítulo I Marco Teórico**

### El ciclo del carbono en sistemas forestales

La composición actual de la atmósfera es resultado del equilibrio de una amplia gama de procesos bióticos y abióticos que determinan un escenario de estados y transiciones de sus principales componentes gaseosos como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI). Dentro de estos procesos, conocidos como Ciclos Biogeoquímicos, ha sido el Ciclo del Carbono el de mayor estudio por la connotación ambiental suscitada en las últimas décadas con relación a fenómenos como el calentamiento global y el cambio climático (IPCC, 2001).

El ciclo del carbono (C) (Figura 1), resulta del equilibrio entre procesos biológicos y fisicoquímicos como la fotosíntesis, respiración, o la absorción de  $\text{CO}_2$  o su liberación de los cuerpos de agua, provocando con ello diferentes tiempos de permanencia del C en los diferentes reservorios o almacenes (Saugier & Pontailier, 2006).

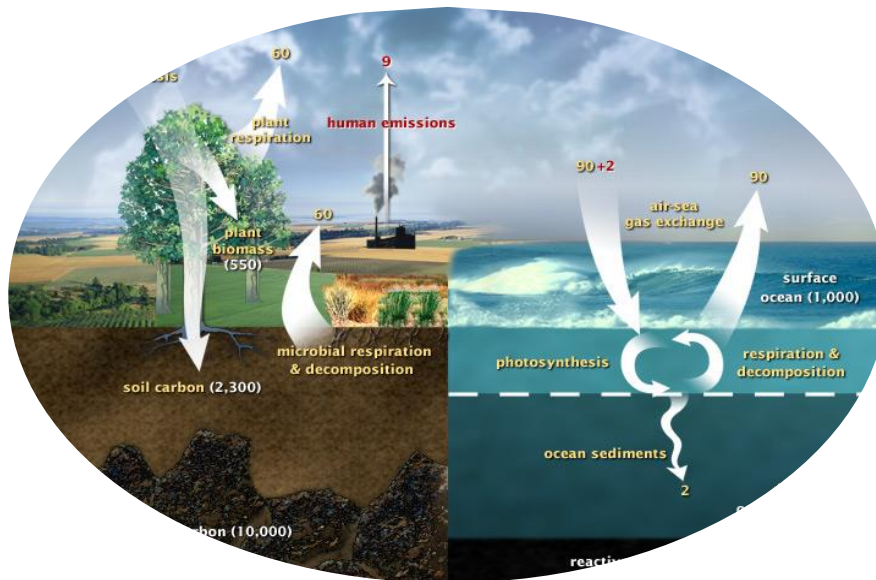


Figura 1 el ciclo global del carbono.

Fuente: Riebeek, 2011

En el ciclo global del carbono, las plantas superiores y otros organismos fotosintéticos adquieren el CO<sub>2</sub> atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidos como estomas y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis; la cantidad de C que se fija durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB), de la cual aproximadamente la mitad se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO<sub>2</sub>, producto de la respiración autotrófica. Al balance entre del C que es fijado en la biomasa con respecto al que es regresado a la atmósfera se le conoce como producción primaria neta (PPN). Eventualmente, en el transcurso del tiempo, una parte del C fijado por vía de la PPN se incorpora al suelo mediante la acción de organismos descomponedores de la materia orgánica

(bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros, así como por la combustión en los fuegos naturales o antropogénicos (IPCC, 2005). Se producen así almacenes de C en el suelo que complementarán el ciclo terrestre al ser emitidos nuevamente a la atmósfera en diferentes periodos conocidos como tiempos de residencia (Jaramillo, 2004). La diferencia entre la fijación de C por la PPN y las pérdidas por la respiración en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (p. ej. el fuego o la cosecha), se conoce como la producción neta del ecosistema. Cuando todas las pérdidas de C (incendios, la cosecha, erosión del suelo) se contabilizan, lo que queda es el C que acumula efectivamente la biosfera nivel global y que se conoce como la producción neta del bioma (PNB) (Jaramillo, 2007).

Los principales almacenes de C en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. De acuerdo con Apps et al. (1993); Brown et al. (1993) y Dixon et al. (1994) citados por Ordoñez (2001), los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre por unidad de superficie y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo. Los ecosistemas terrestres se comportan actualmente como un sumidero de carbono que representa aproximadamente 2,000 Mg C y se estima que su degradación y/o cambio de uso representa alrededor del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por las actividades del hombre (Ordoñez & Masera, 2001). La mayor parte de este sumidero parece resultar de un aumento de la producción vegetal asociado al aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico y al calentamiento global. Otra parte viene del aumento de la producción de los cultivos, praderas y bosques aprovechados por el hombre (Saugier & Pontailier, 2006).

En la Figura 2 se representan los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal, donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, los productos y el humus estable son almacenes o reservorios temporales de carbono, mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal.

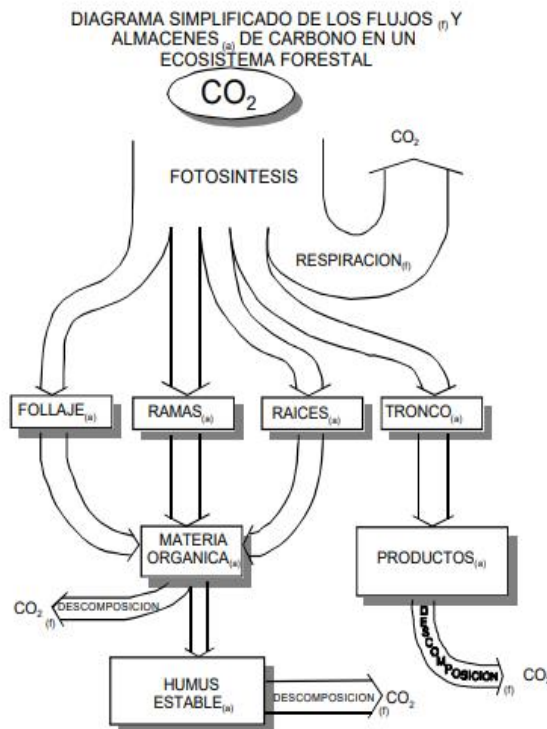


Figura 2 Diagrama simplificado de los almacenes y flujos de carbono en un ecosistema forestal  
Fuente: Ordoñez, 1999.

En los ecosistemas forestales es necesario distinguir dos componentes del ciclo del carbono: los almacenes que contienen el C en la biomasa y el suelo y los flujos que son transiciones de C entre un almacén y otro. Asimismo, la expresión “sumidero

de carbono” se refiere a la existencia de un flujo neto de carbono desde la atmósfera al sistema, mientras que la expresión “fuente de carbono” significa un flujo en sentido inverso, desde el sistema a la atmósfera (Pardos, 2010).

Con la firma del Protocolo de Kioto, se consideró como sumidero a todo aquel sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena, siendo por tanto actividades como la silvicultura, agricultura o ganadería sustentable, propicias para este fin (Arbestain, 2004). De acuerdo a Vega (2007), en el caso de las plantaciones forestales la captura de carbono se realiza principalmente durante el desarrollo de los árboles, en donde absorben CO<sub>2</sub> atmosférico que se transforma en biomasa, por lo que en esta etapa en la vida del árbol, hay una captura neta de carbono, hasta alcanzar su madurez; posteriormente, el árbol reduce su tasa de incorporación de C hasta lograr un equilibrio con las emisiones por respiración a la atmósfera (Seppänen, 2002).

Se estima que el 80% del carbono que la vegetación y suelos intercambian con la atmósfera corresponde a los bosques (FAO, 2001), por lo que los ecosistemas juegan un papel importante en el balance de carbono, contribuyendo a reducir el contenido en la atmósfera del CO<sub>2</sub> procedente de las emisiones antropogénicas. El potencial de secuestro de carbono de una masa forestal dependerá de la composición de especies, su estructura y clases de edad y de las características de la estación, incluyendo clima suelos y gestión (Pardos, 2010).

#### Medición de los almacenes de carbono en biomasa.

Para estimar el carbono fijado en la biomasa forestal, una de las alternativas más empleadas consiste en el uso de modelos matemáticos que permiten estimar el

volumen de biomasa y carbono en función de unas pocas variables de fácil medición, tales como el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y/o la altura total. (Segura y Andrade, 2008). Estos métodos conocidos como alométricos parten de los estudios realizados por Thompson (1917) y Huxley (1932), quienes sentaron las bases del escalamiento alométrico en biología que establece una relación matemática en el patrón de crecimiento de un individuo y que se resume en la forma  $Y=aX^b$ , donde la variable biológica Y depende de la masa del cuerpo X a través del exponente de escalamiento b y de una constante a que es característica de la clase de organismo (Delgado et al., 2005).

Aunque este enfoque ha prevalecido en los estudios sobre animales, otros estudios han demostrado el poder del análisis alométrico para interpretar variaciones en los organismos vegetales (Niklas & Enquist, 2002), por lo que su uso en la biología vegetal ha consistido principalmente en el desarrollo de relaciones correlativas entre variables vinculadas al tamaño para aplicaciones en la agricultura, funcionamiento de ecosistemas y manejo de bosques.

Los modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono (VBC) ayudan a estimar el almacenamiento de carbono en sistemas forestales y agroforestales a partir de variables dasométricas como el diámetro y la altura, pudiendo ser obtenidos para cada especie arbórea, de acuerdo a su patrón de crecimiento. De acuerdo con la [De la Vega \(2010\)](#), la dendrometría o dasometría implica la determinación del volumen de árboles completos y de sus partes, las existencias de madera en rodales, la edad y el incremento de árboles individuales y de rodales completos, así como la magnitud y volumen de sus productos. Para este estudio se emplearán los modelos alométricos obtenidos previamente para las diferentes especies arbóreas

empleadas para la reforestación del PESM.

### Definición e importancia de los servicios ambientales

Los ecosistemas son el sustento de las actividades económicas dado que proveen materias primas para los procesos productivos y a su vez son el sumidero de los desechos tanto productivos como consuntivos. Los servicios ecosistémicos o Servicios Ambientales (SA), contribuyen a la salud del ecosistema global y la de los seres humanos en particular (González & Figueroa, 2013).

Camacho y Ruiz (2012) citan a diferentes autores dentro del análisis de enfoques sobre los servicios ambientales con el fin de unificar criterios y esbozar un concepto básico más definido sobre los mismos, señalan que de acuerdo con Carson (1962), Saville y Bayley (1980), el concepto de SA tiene sus orígenes en el movimiento ambientalista en las décadas de 1960 y 1970, a raíz de la denuncia de los efectos negativos de la contaminación, la deforestación de bosques, tropicales particularmente, la reducción de la capa de ozono y el cambio en el clima, Farman (1985), señala que el término fue propuesto oficialmente dentro del documento Evaluación de los Ecosistemas del Milenio con la intención de incluir las preocupaciones ecológicas en términos económicos y enfatizar la dependencia de la sociedad en los ecosistemas naturales, además de impulsar el interés público en la conservación de la biodiversidad, mencionan a Westman (1977), como el primero en plantear como “servicios de la naturaleza”; en el sentido de reconocer a los recursos naturales necesarios para el bienestar humano mientras que Daily (1997), se refiere a estos como “Las condiciones y procesos a través de los cuales



los ecosistemas naturales y las especies que lo constituyen sustentan y satisfacen a la vida humana” (Camacho & Ruiz, 2012).

De Groot et al. (2002), Incluyeron al subconjunto de funciones del ecosistema sus relaciones y capacidad para producir bienestar, directa o indirectamente a la humanidad, resaltando así el carácter antropocéntrico del enunciado, mencionando que una vez que las funciones de un ecosistema son definidas, la naturaleza y la magnitud de su valor para las sociedades humanas pueden ser analizadas y evaluadas a través de los bienes y servicios proporcionados por cualquier ecosistema.

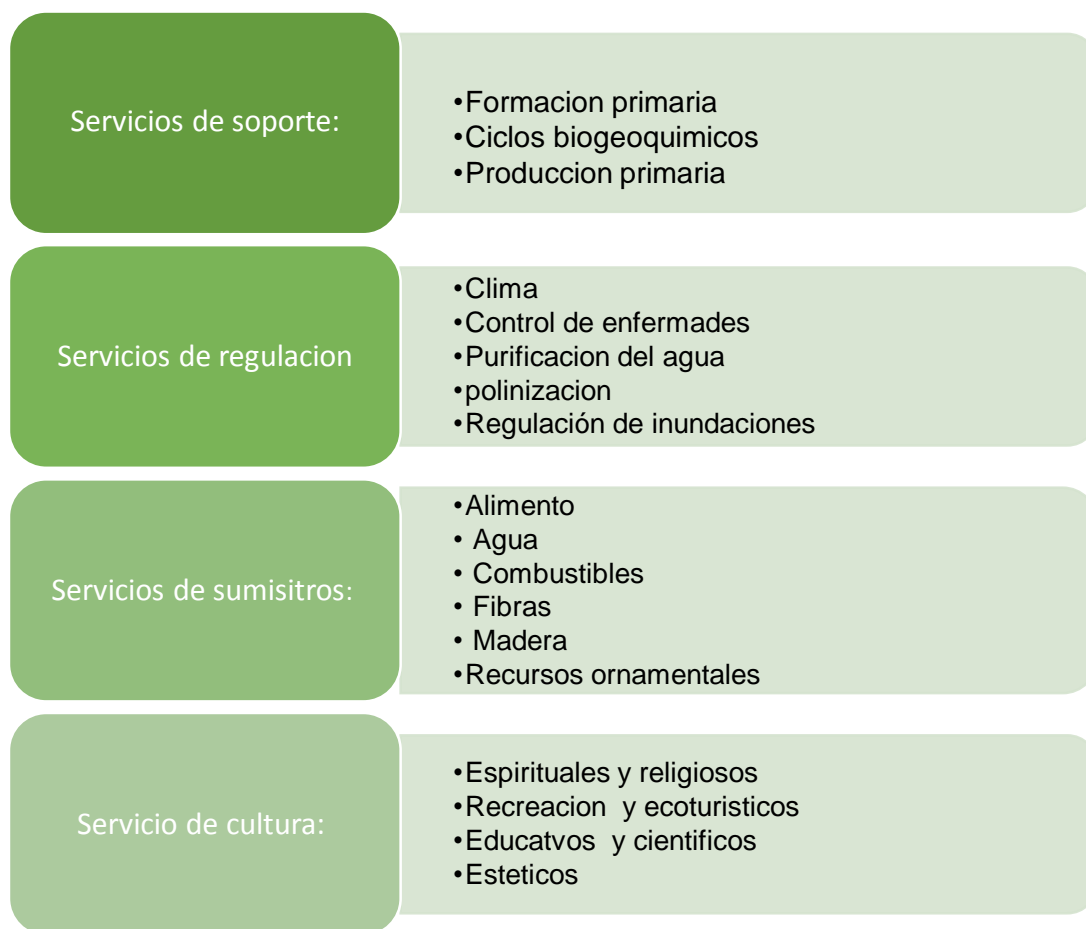
Por su parte, la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA, 2004), define a los SA como “Aquellas funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano o tienen un potencial para hacerlo en el futuro”, siendo la primera instancia en considerar a los recursos naturales como bienes potenciales. Una definición más reciente fue la realizada por Fisher et al. (2009), quienes puntualizan que los servicios ambientales “son fenómenos estrictamente ecológicos (estructura, procesos o funciones), cuyo uso pasivo o activo puede ser directo o indirecto y se convierten en servicios si los humanos se benefician de ellos, por lo que sin estos beneficiarios no hay servicios”.

Como se podrá observar, la definición de servicios ambientales ha tenido distintas variantes desde el inicio de su conceptualización lo cual se debe tanto al enfoque como a los aspectos que cada autor prioriza. Otro aspecto que debe resaltarse es su carácter intangible que dificulta la discusión en torno a su valor económico y si en términos de algunos expertos, la naturaleza debiera tener un valor económico (Macip, 2013).

No obstante, la confrontación de puntos de vista sobre su concepción, en el terreno práctico, para la gestión más óptima de estos servicios fue necesario establecer una clasificación con la cual se pudiera identificar qué tipo de servicio ecosistémico se está aprovechando, añadiéndole un valor intrínseco y considerando la interdependencia entre las funciones, los bienes y servicios. Actualmente, una de las clasificaciones más aceptadas es la propuesta por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005), y en ésta se incluyen diferentes opciones:

- Servicios de soporte. Necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos.
- Servicios de aprovisionamiento. Productos obtenidos del ecosistema.
- Servicios de regulación. Bienes obtenidos mediante de la regulación de los procesos del ecosistema.
- Servicios culturales. Beneficios no materiales que la gente obtiene de los ecosistemas.

En la figura 3 se presentan ejemplos de los servicios ambientales de forma esquematizada, establecidos por los autores referidos.



*Figura 3 Ejemplos de Servicios ambientales.*

*Fuente: elaboración propia adaptada de Comisión Nacional Forestal 2015*

Kremen (2005), menciona que el flujo y el tipo de servicios que proveen los ecosistemas depende de múltiple factores, entre ellos se encuentra a) La unidad proveedora de servicios ambientales (bosque, humedal, mar, pradera, terrenos agrícolas, entre otras) y el estado de conservación de estas unidades; b) La vegetación de los bosques por su parte, disminuye la escorrentía superficial y con esto el arrastre de sedimentos hacia los cursos de agua, contribuyendo a la

mitigación del efecto invernadero gracias al secuestro de carbono; c) Adicionalmente, la masa forestal constituye un atractivo natural para el desarrollo espiritual y religioso, además de ofrecer oportunidades para desarrollar actividades recreativas en un entorno natural.

La captura de carbono es considerado como un servicio ambiental de regulación, basado en la capacidad de los árboles para absorber y almacenar el carbono atmosférico en forma de biomasa (FAO/OAPN, 2009). Los niveles de absorción pueden ser mejorados con el manejo adecuado de los ecosistemas forestales, evitando su conversión en fuentes emisoras de gases de efecto invernadero (ECURED, 2018).

### **La captura de carbono como servicio ambiental en los parques urbanos**

En la actualidad existe una tendencia por estudiar los espacios abiertos y las zonas verdes en las ciudades desde diferentes perspectivas en donde el potencial natural de cualquier área del paisaje en la práctica dependerá de un número de factores que resalten las características físicas del sitio, entre ellos tamaño y complejidad. (Romero et al., 2018).

El concepto “bosque urbano” hace referencia al conjunto de recursos naturales: agua, suelo, clima, paisajes, plantas y organismos asociados, que se desarrollan relacionados con los elementos de los asentamientos humanos, creciendo cerca de edificios, en jardines públicos y privados, en parques urbanos de diversa escala, en lotes baldíos, cementerios, etc., así como en las áreas agrícolas, forestales y naturales, localizados en el área urbana y periurbana de la ciudad. Este concepto

amplía la perspectiva del importante y diverso papel que posee la vegetación de las áreas verdes para aminorar los impactos negativos de la urbanización sobre los ecosistemas regionales y el mejoramiento de la calidad ambiental de las ciudades, las cuales, por otra parte, constituyen actualmente el hábitat humano dominante en el planeta (Meza & Moncada 2010).

En las ciudades los parques urbanos representan sistemas ambientales a menudo restringidos, pero juegan un importante papel para el ser humano, desempeñando una doble función, por un lado contribuyen en el aspecto social y por otro al factor en el ámbito ecológico. La generación de información para estimar la capacidad presente y futura de la magnitud de servicios ambientales que pueden prestar los parques urbanos, puede constituir una alternativa para revalorizar su papel y motivar a sociedad y autoridades a emprender acciones de manejo y conservación a largo plazo.

Los parques urbanos son áreas verdes que proporciona importantes servicios ecosistémicos, como regulación del microclima en el sitio, además de que la presencia de masas vegetales también contribuye a la mejora del clima a las zonas (Martínez 2008), y como lo menciona Fernández-Murciano (1998), disminuyendo la temperatura entre 0.6 y 5°C en comparación con las zonas urbanas próximas, gracias al aumento de la humedad relativa combate la sequedad ambiental actuando como regulador higrométrico y como regulador la temperatura, simultáneamente contribuye la captación de agua, recreación, acondicionamiento físico y cultura, el control de la erosión de los suelos y ayudan a fijar el polvo, gases tóxicos, materiales residuales, a nivel de contaminación sónica funcionan como pantallas de nivelación al sonido (Lorca, 1989), y el potencial para la mitigación local

de las emisiones de CO<sub>2</sub>, este servicio ambiental es de gran importancia ya que influye de manera directa sobre la calidad de vida de los ciudadanos, al reducir los niveles de CO<sub>2</sub> (Pagiola & Platais, 2002). En el siguiente apartado, se hace un recuento de diferentes experiencias relacionadas con los estudios de captura de carbono en áreas verdes de México.

El estudio realizado en la ciudad de Tijuana por Madrid (2016), tuvo como objetivo estimar la capacidad potencial que los parques urbanos tienen como sumideros de carbono para contrarrestar las emisiones de GEI que el parque vehicular de la ciudad emite evaluando su eficiencia como estrategia de mitigación ante los efectos del cambio climático. Para la evaluación se tomó la superficie de 92,108.727 hectáreas del centro de población de Tijuana y a 10 de sus delegaciones y se realizaron diferentes escenarios potenciales de la captura de carbono y se estimó cuanto CO<sub>2</sub> captura y almacena el arbolado de los parques urbanos para compararlo con lo que producen los vehículos automotores, la investigación se documentó en dos ejes principales el referente a las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir del consumo de combustible del sector transporte y el CO<sub>2</sub> capturado por los árboles de los parques existentes.

Los resultados Indicaron que el valor de la captura de CO<sub>2</sub> de los parques muestreados durante el 2015, fue de 263,137 kg, con una producción per cápita de 3.6 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> /año, considerando su cobertura arbórea real durante el 2015 y al ampliar la información a los 240 parques de Tijuana, se estimó que fueron capturadas 21,372 toneladas de CO<sub>2</sub> durante el 2015. Se encontraron 68 especies en los parques, sin embargo, solo dos especies *Ficus benjamina* y *Eucalyptus globulus* concentran el 38% de los individuos inventariados. La mayoría de los

árboles son jóvenes ya que el 80% de estos tuvo un DAP menor a 30 cm lo que es positivo pues señala el potencial que le queda para captura y almacenar CO<sub>2</sub> durante lo que les resta de su periodo de vida (Madrid, 2016). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

*Tabla 1 Capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de diferentes superficies de parques en Tijuana*

Contenido de cada escenario	Captura de CO <sub>2</sub> (kg)	% CO <sub>2</sub> capturado/ superficie arbolada	Superficie arbolada (m <sup>2</sup> )	% de superficie Tijuana
<b>Total de 240 parques (Heber &amp; Ojeda, 2014)</b>	2,131,084	0.08	593,659	0.06
<b>Total de parques con 87.5% de cobertura arbórea</b>	6,074,749	0.23	1,693,712	0.18
<b>Todos los tipos de áreas verdes (IMPLAN, 2014*) con 87.5% de cobertura arbórea.</b>	16,963,913	0.65	4,729,740	0.51
<b>Hipotética. Parámetro recomendado por Sedesol (Sedesol, 1999) de 4m<sup>2</sup> /habitante (promedio de kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/año).</b>	24,337,989	0.93	6,785,720	0.74
<b>Hipotética. Parámetro recomendado por la Organización Mundial de la Salud (Sedesol, 2010) de 10 m<sup>2</sup> /habitante (promedio de</b>	60,844,973	2.32	16,964,300	1.84

kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /año).				
Hipotética. Parámetro recomendado por la Organización de las Naciones Unidas (Sedesol, 2010) de 16 m <sup>2</sup> /habitante (promedio de kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /año).	97,351,956	3.71	27,142,88	0 2.95

Fuente: Madrid, 2016.

En este caso el escenario más factible fue el 3 ya que es una superficie con la que se cuenta ya actualmente por lo que no sería necesario gestionar el implementar nuevas áreas verdes, solo consiste en llevar a cabo una reforestación con la que se incrementaría un poco más de 8 veces lo que se está capturando actualmente por el arbolado en los parques.

Por otra parte, dentro de la investigación se realizó un cuadro comparativo de datos de diversos estudios adaptándolo a la zona de baja california y el resultado se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Estimación de captura de CO<sub>2</sub> del arbolado en parques de otras ciudades.

Ciudad	Referencia	Promedio captura (kg CO <sub>2</sub> m <sup>2</sup> /año)	Captura (kg CO <sub>2</sub> /año)	Área parque (m <sup>2</sup> )	Densidad Individuos ( Ind. / m <sup>2</sup> )	
<b>Dade EUA</b>	Escobedo, 2010	0.0021	241,000	113,380,000	11,147,061	0.10
<b>Barcelona</b>	Chaparro	0.2208	1,002,000	4,537,780	212,437	0.05



<b>España</b>	Terradas, 2009					
<b>Unley Australia</b>	Baldocchi, 2008	0.2506	10,079	40,226	683	0.02
<b>Chicago EUA</b>	Nowak et al., 2009	0.9884	25,200,000	25,495,218	274,000	0.01
<b>Tijuana México</b>		1.5726	263,137	167,323	3,097	0.02
<b>Gainesville EUA</b>	Escobedo, 2010	13.5609	36,750,000	2,710,000	128,975	0.0476

Fuente: (Madrid, 2016)

Como se puede apreciar el valor calculado para Tijuana, es bastante superior al reportado para ciudades como Barcelona en España, pero menor a otras como Gainesvill, EUA.

Otro estudio realizado en parques urbanos de la Ciudad de México se da cuenta de la importancia de los servicios ecosistémicos que brindan los parques urbanos y puntualiza que la captura del carbono como un servicio ambiental incide directamente en la calidad de vida de las personas. Para la investigación se levantaron datos de especie, altura, diámetro y condición de cada árbol dentro de 10 parques y se estimó la biomasa y contenido de carbono mediante el uso de ecuaciones alométricas, de acuerdo a la especie. Se registraron un total de 1,945 individuos, pertenecientes a 48 especies se las cuales las que mostraron mayor frecuencia fueron *Fraxinus uhdei* (Wenz.) (Fresno), *Cupressus lusitánica* Mill., *Ligustrum lucidum* Ait., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Casuarina equisetifolia* L. y *Jacaranda mimosifolia*, que conformaron el 82.98% del arbolado total. Los árboles

muestreados presentaron una altura que varió de 2 a 40 m y un DAP de 5 a 134 cm, con un promedio de 11.5 m y 22.6 cm, respectivamente.

Tabla 3 Biomasa y contenido de C para los estudios referenciados

Parque	No. de árboles	Biomasa Mg/500 m <sup>2</sup> (promedio)	Contenido de C Mg/500 m <sup>2</sup> (promedio)
Abelardo L. Rodríguez	82	9.0	5.1
Los Morales	68	3.6	1.7
Alameda Tacubaya	90	7.7	3.9
Tacuba	81	4.5	2.0
Rio San Joaquín	144	8.1	4.6
Lira	357	1.5	0.7
Jardín de los Leones	132	9.8	4.6
Jardín La Milla	165	8.6	3.9
Parque Tamayo	366	3.7	1.7
Vía Reforma	460	12.5	3.6
Promedio		6.9	3.2

Fuente: (Santoyo, García y Benavides; 2014)

En los resultados obtenidos se mostró que la biomasa promedio fue de 6.9 Mg/500m<sup>2</sup>, mientras que el contenido de carbono fue de 3.2 Mg C/500m<sup>2</sup>. Se estimó que el bosque urbano de la delegación Miguel Hidalgo en sus 1, 243.93 ha de áreas verdes arboladas almacenan 79,180.9 Mg C (Santoyo, García y Benavides, 2014).

Por último, el estudio de caso llevado a cabo en la ciudad de Toluca por Mañón, Orozco & Mireles (2018), evaluó los servicios ambientales del Parque Metropolitano Bicentenario (PMB), mediante muestreos no destructivos; infiltración de agua en

suelo, temperatura y humedad ambiente, presión acústica interior y exterior y estimación del almacén de carbono.

Para esta investigación, es importante retomar los resultados obtenidos del carbono total estimado que ascendió a 517.958 Mg C. La estructura por edades arrojó que el 40% son jóvenes, 36% maduros y 24% seniles en donde árboles maduros presentaron mayor altura, volumen, biomasa y carbono. Los árboles jóvenes tuvieron menor altura, volumen, biomasa y carbono. Sin embargo, estos desarrollan mayor actividad fotosintética a través de la cual fijan CO<sub>2</sub> atmosférico necesario para su crecimiento y liberan oxígeno.

Por otra parte dentro del PMB se obtuvo que la mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono se encontró en las especies de *Cupressus lusitánica* (cedro blanco) y *Pinus cembroides* (Pino piñonero), *Eucaliptus camaldulensis* (eucalipto rojo) y *Eucaliptus globulus* (eucalipto azul) y como estrategia se recomendaron como especies adecuadas para la reforestación o forestación: *Fraxinus uhdei* (fresno), *Chirandanthedendron pentadactylon* (árbol de las manitas), *Liquidambar styraciflua* (Liquidámbar), *Crataegus mexicana* (Tejocote) y *Prunus serótina* (Capulín) (Mañon, et al. 2018).

Existen diferentes modelos de proyección, siendo uno de ellos el de los escenarios prospectivos. Bajo este modelo, existen diferentes formas de aproximarse al futuro, siendo la prospectiva la única que lo aborda como una realidad múltiple e indeterminada, obtenida como resultado de las infinitas posibilidades de acción humana. (Cely, 1999)

Esta metodología se desarrolla en tres fases: análisis estructural, análisis del juego

de actores y elaboración de escenarios, cuyo propósito es analizar el fenómeno en estudio desde un punto de vista retrospectivo y actual, teniendo en cuenta la influencia de los grupos sociales gestores de su desarrollo para, posteriormente, presentar la realidad futura en forma de escenarios.

- Escenarios posibles: son todos aquellos escenarios que se puedan imaginar sin importar si su probabilidad de ocurrencia es alta o baja.
- Escenarios realizables: son los escenarios cuya ocurrencia es factible, teniendo en cuenta todas las restricciones del sistema.
- Escenarios deseables: son los escenarios a los que los actores desean llegar, también pueden ser calificados como los escenarios más convenientes. Forman parte de los escenarios posibles y no necesariamente son realizables.

Es muy importante tener claros los conceptos y las definiciones de los mismos que utilizamos ya que estos están en constante cambio y el concepto nos ayuda a tener un mejor punto de partida de nuestro trabajo y vislumbrar hacia dónde va orientado nuestro tema, de lo contrario no podríamos justificar o aclarar porque entendemos ciertos conceptos de alguna forma, no con el fin de defender este trabajo sino de que quien lo pueda leer, entienda de lo que estamos hablando y que no exista confusión con los temas que estamos manejando.

## La gestión de parques urbanos en el Estado de México: caso de estudio Parque Sierra Morelos

En el Estado de México, el organismo encargado de la gestión integral de los parques urbanos es la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF), creada en el año de 1978 como un organismo desconcentrado del poder ejecutivo estatal. En 1988, CEPANAF fue incorporada al sector agropecuario, para luego pasar a formar parte en 2004 de la Secretaría de Ecología como organismo descentralizado y adscrito a esta dependencia. Entre las funciones que desarrolla actualmente este organismo se encuentran:

- Elaborar y proponer programas y acciones para crear, proteger, fomentar, conservar, y utilizar racionalmente los recursos renovables de flora y fauna, comprendidos dentro de las áreas declaradas como parques naturales de creación popular y en los zoológicos establecidos dentro del territorio del Estado.
- Coordinar sus actividades con dependencias y organismos federales, estatales y municipales, organismos internacionales o con organizaciones no gubernamentales para el cumplimiento de su objeto.
- Proponer al Ejecutivo del Estado la creación o ampliación de parques y de reservas de flora y fauna, así como de zoológicos.
- Vigilar y controlar los parques estatales, áreas naturales protegidas, reservas y zoológicos con arreglo en las disposiciones legales en la materia.
- Administrar los parques federales concesionados por las autoridades federales al Estado.

- Promover mecanismos de coordinación para la forestación de parques, áreas naturales protegidas y zoológicos y demás trabajos que se determinen para esas áreas.
- Formular y proponer al Ejecutivo del Estado, programas para el establecimiento de cotos de caza para la práctica del deporte cinegético.
- Organizar, conservar, vigilar, controlar y administrar todo lo relativo a la utilización y aprovechamiento de los parques, reserva de fauna y zoológicos.

Dentro del ámbito de su competencia, la CEPANAF considera tres formas de gestión de los espacios naturales: a) Áreas Naturales Protegidas, b) Parques Recreativos y c) Programas Especiales. Bajo estas categorías, el Parque Estatal Sierra Morelos, objeto de estudio dentro de esta investigación, se ubica en la categoría de parque recreativo.

De acuerdo con el Código para la Biodiversidad del Estado de los parques estatales deben ser protegidos y valorados en virtud de los múltiples servicios que prestan a la sociedad tales como su belleza escénica, valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico y por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo sostenible (GEM, 2008). Bajo esta connotación, estas áreas públicas son concebidas como espacios en donde además de la recreación y el esparcimiento se pueden ofrecer alternativas y proyectos sustentables que permitan elevar la calidad de vida y cuenten con una perspectiva orientada hacia un futuro prolífico, sin poner en riesgo la riqueza natural (CEPANAF, 2020).

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca hay 72 áreas verdes con un total de 4,870 ha (Romero, 2018), el más importante en extensión es el Parque Estatal

Sierra Morelos (PESM), creado por decreto 22 de julio de 1976, es una de las áreas naturales más visitadas de Toluca por su fácil acceso y cercanía con la zona urbana. Otrora situado en la periferia de la ciudad, actualmente se encuentra inmerso en ella, siendo sujeto de múltiples presiones de índoles social y económica que han afectado su capacidad natural para proveer de bienes y servicios a los habitantes de la ciudad de Toluca. Los registros más recientes indican que el parque recibe en promedio 87,000 visitantes al año (CEPANAF, 2008), la mayoría de ellos procede de Toluca y de los municipios aledaños de Zinacantepec, Metepec, Almoloya de Juárez, Calimaya y Oztolotepec. (Sierra et.al., 2008).

Por otra parte, desde su decreto hasta la actualidad ha sido centro de diversos conflictos en cuanto los límites de tenencia del polígono establecido, en donde la mayor parte es propiedad privada, lo que implica un conflicto en el momento de realizar obras dentro del parque. Como se puede observar en la Tabla 4, tan solo el 24% de la superficie pertenece al sector público, ya sea estatal o municipal

*Tabla 4 Tenencia de la superficie del PESH*

Tipo de tenencia de la tierra	Superficie (ha)	Porcentaje %
Ejidal	196	16
Comunal	230	18
Privada	521	42
Sector público (estatal y municipal)	308	24
Total	1, 255	100

*Fuente (Sierra et. al., 2008)*

De acuerdo con Sierra (2008), en el parque se encontraban un total de 79 de dueños de casas habitación y 136 terrenos a los cuales se les otorgó el permiso de

permanecer viviendo en el área y la superficie ocupada se estableció en 12.65 ha en donde se encontraba infraestructura rudimentaria, una calle empedrada y brechas que comunicaban las localidades, además de terrazas que terrenos aislados que separaban el área contigua del terreno privado del parque estatal.

En los años posteriores, la superficie ocupada aumentó y esto se notó en el área conocida como La Teresona, en donde el registro de 1983 se tenía como pavimentación con densidad de 16% sin embargo, para el año 2000 aumento a un 58% y como evidencia de esto los terrenos de cultivo fueron sustituidos por nuevas construcciones de casas habitación.

Según registros de la CEPANAF, y referidos por Sierra (2008), después del decreto, nuevos habitantes fueron asentándose al interior de la poligonal, de acuerdo con los siguientes datos:

- Superficie total del PESH: 1,255 ha.
- Superficie ocupada por casas habitación en 1976: 12.6 ha.
- Superficie ocupada por casas habitación en el 2000: 89.6 ha.

Todos estos conflictos de territorio y desconocimiento de la demarcación del área real del polígono establecida como Parque Estatal trajeron consigo conflictos al momento de realizar actividades o campañas de forestaciones y reforestaciones por lo que la gran mayoría de estas actividades se concentran en la parte baja y principal del parque.

De acuerdo con información provista por funcionarios de CEPANAF, desde el año de 1985 (aunque las evidencias indican que mucho antes de esta fecha), se han



emprendido campañas de reforestación y forestación tendientes a repoblar parte de su superficie con especies arbóreas, de acuerdo a los esquemas de gobierno imperantes a través del tiempo. Es así como en los inicios de estas campañas, se optó por el uso de especies exóticas como casuarinas y eucaliptos, sin embargo, bajo la óptica actual, la función ecológica de estas especies en las reforestaciones han sido excluidas por presentar diversos inconvenientes como son: poseer un sistema radicular superficial sensible a los vientos fuertes, adicionalmente, varias de estas especies producen sustancias alelopáticas que impiden el desarrollo de otras plantas con lo que al quedar el suelo desprovisto de una cubierta vegetal, se desencadenan procesos erosivos moderados a severos (Sierra et al., 2008). Posteriormente, se introdujeron otras especies de pino, cedros, fresno, oyamel y capulín. La tabla 5 muestra el listado completo de especies forestales identificadas en el PESM.

*Tabla 5 Listado de especies arbóreas introducidas al Parque Estatal Sierra Morelos durante las campañas de reforestación*

<b>Especie</b>	<b>Nombre común</b>
<i>Cupressus lindleyi</i>	Cedro blanco
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno
<i>Prunus serotina</i>	Capulín
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel
<i>Pinus montezumae</i>	Pino
<i>Pinus patula</i>	Pino
<i>Pinus radiata</i>	Pino
<i>Eucaliptus globulus</i>	Eucalipto
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina

*Fuente: Elaboración propia, con base en Sierra 2008 e información de campo*

El PESM ha sido escenario de distintos procesos tanto naturales como antrópicos que han influido sobre la permanencia de vegetación en el área, un ejemplo de ello son los incendios que se dieron lugar principalmente durante los años de 1997 a 2001, siendo el año de 1998 el más perjudicado con un total de 14 incendios, lo cual da indicios sobre la vulnerabilidad social y climática a que está sujeta esta área verde

De acuerdo con de la Rosa (comunicación personal), las autoridades estatales y municipales emprendieron campañas de reforestación en el PESM en la parte alta a partir de 2008 y posterior a ello, la dirección del Medio Ambiente del Municipio de Toluca y el Instituto Tecnológico de Toluca por medio de su Programa Ambiental Institucional (PAI), están ejecutando un programa titulado: “Programa de Preservación del Parque Sierra Morelos de la ciudad de Toluca”, en donde se ha contado con la participación de miles de personas habitantes del Valle de Toluca a través de actividades de limpieza, forestación, manejo de agua, captación de agua de lluvia, hidratación de árboles, poda de rama baja y saneamiento del bosque.

En dicho programa las empresas u organizaciones hacen el compromiso de adoptar un predio en el parque para forestarlo y darle mantenimiento en el periodo de estiaje durante cuatro años consecutivos. El programa mencionado consta de cuatro puntos torales: forestación, deshierbe, adición de lama e hidratación. Al terminar los cuatro años del compromiso, las Instituciones entregan al ambiente árboles con cuatro años de vida, siendo autosuficientes para continuar su crecimiento hasta llegar a la etapa adulta. En la Tabla 6 se puede observar el avance de las plantaciones de los periodos de 2013 a 2018.

Tabla 6 Registros de plantaciones

Año	Individuos	Superficie (ha)	Densidad Ind/ha	Eficiencia estimada (%)
<b>2013-2014</b>	12,590	12	1049	85%
<b>2015-2016</b>	6,090	6.5	937	80%
<b>2017-2018</b>	10,400	10	1,047	80%
<b>2018-2019</b>	26,549	18	1067	80%

Fuente: elaboración propia, con base en registros proporcionados por de la Rosa (2018).

De acuerdo a la fuente citada, la tasa de supervivencia en el caso de un cuidado adecuado y siguiendo la metodología establecida para la forestación de PESM varía de un 80% a 85%, por otra parte, si no se lleva a cabo se aproxima a un 45%.

Existen evidencias de que previo al decreto estatal, en el parque ya existían áreas con diversos grados de erosión y prácticamente sin vegetación arbórea, por lo que, en el terreno propiedad del gobierno estatal destinado a los servicios, inició la aplicación de técnicas para la recuperación de suelos. Dicho terreno ocupa la ladera sur de los cerros de Enmedio y Los Tejocotes, y la ladera oeste del cerro La Teresona. Por otro lado, la introducción de ganadería de tipo extensivo a base de bovinos, ovinos y caprinos, así como el uso del arado en suelos incipientes, junto al abandono de terrazas, provocó la generación de procesos erosivos que persisten hasta la actualidad. Otros temas a considerar son las plagas y enfermedades que están afectando las reforestaciones.

La especie arbórea que cubre la mayor superficie y forma rodales casi puros es *Pinus radiata* (10.47%). Dicha especie, originaria de la región occidental de Estados Unidos, ha sido ampliamente utilizada con fines de reforestación en las zonas templadas de México, pero no está exenta de plagas como la del gusano barrenador *Dendroctonus adjunctus*. Aunado a esto, los incendios forestales anuales provocan el debilitamiento progresivo de los árboles hasta causar su muerte.

Una especie exótica usada para reforestar es el eucalipto (*Eucalyptus globulus*), que se encuentra distribuida en el 17.78% del área. Aunque no ha logrado reproducirse, alcanzó su estado de madurez, hecho que se ve reflejado en floración y frutos. Las reforestaciones que anteriormente se realizaban dentro del parque no habían sido de gran utilidad debido a las especies utilizadas, que al tener un sistema radicular superficial y a su proceso alelopático no contribuyen a la formación de nuevo suelo e impiden el desarrollo de otras plantas, por otra parte, estas especies en especial los eucaliptos son fácilmente derribados por los vientos fuertes.

Un problema muy común en los bosques del país son los incendios y el PESM no es la excepción: anualmente las partes altas son víctimas del fuego intencional que efectúan los agricultores para quemar los rastrojos y hierbas, así como personas que queman basura o simplemente por inconsciencia. Estos eventos son frecuentes y perjudican el desarrollo y permanencia del bosque. (CEPANAF, 2015).

La generación de información para estimar la capacidad presente y futura de la magnitud de servicios ambientales que pueden prestar los parques urbanos, puede constituir una alternativa para revalorizar su papel y motivar a sociedad y autoridades a emprender acciones de manejo y conservación a largo plazo.

## **Capítulo II Materiales y Métodos**

### Caracterización de la zona de estudio

#### Ubicación

El PESM se ubica dentro de la provincia del Eje Neovolcánico, subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 1987). Se localiza al norte de la Ciudad de Toluca teniendo por coordenadas extremas 19° 20' 00" a 19° 17' 47" de latitud norte, y 99° 39' 00" a 99° 43' 25" de longitud oeste. Se extiende longitudinalmente de oriente a poniente, ocupando una superficie de 1,255 ha desde la cota 2,630 msnm, hasta los 3,040 msnm cima del Cerro de La Teresona. Se encuentra rodeado en su parte sur y este por la Ciudad de Toluca y localidades conurbadas como: Santiago Miltepec, Santa Cruz Atzacapotzaltongo, Calixtlahuaca, San Marcos Yachiualcaltepec, Santiago Tlaxomulco, Tecaxic y San Mateo Oxtotitlán. Asimismo, roliferan nuevos crecimientos urbanos ubicados en ejidos de la zona plana y en declives suaves en torno a los cerros aledaños. El polígono del parque (Figura 4), está incluidos en los municipios de Toluca con aproximadamente 1229.90 ha, que abarcan un 98% del total y Zinacantepec con 25.10 ha con un 2%.

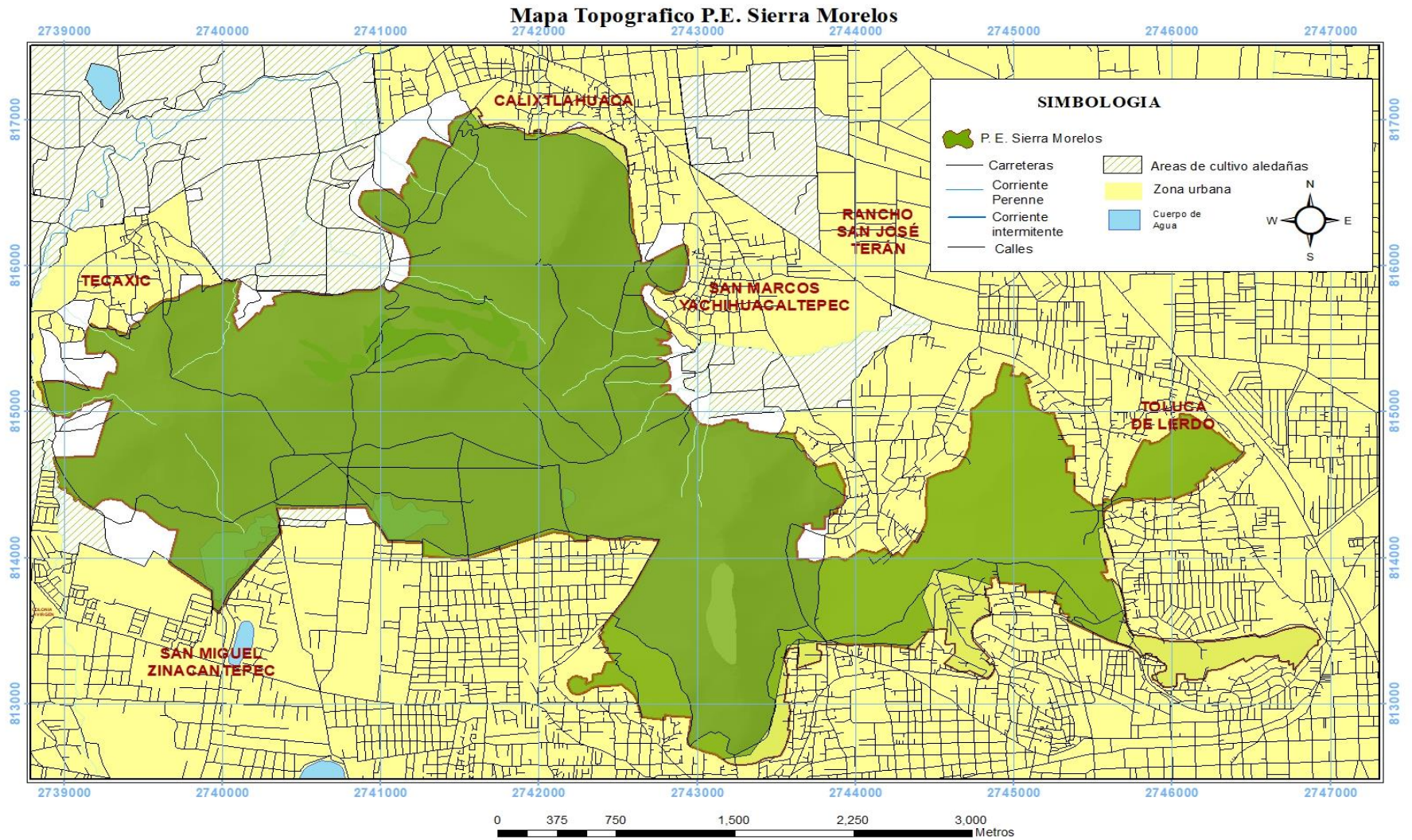


Figura 4 Mapa topográfico del Parque Estatal Sierra Morelos, elaboracion propia con fuente en INEGI

## Clima

De acuerdo con García (2004), en el área predomina el clima C(w2) (w)b(i)g templado húmedo. Las temperaturas más bajas se registran diciembre, enero y febrero con valores que oscilan entre  $-2^{\circ}$  y  $8^{\circ}$  C y las heladas son muy frecuentes en esta época, las temperaturas más altas se presentan entre abril y mayo con temperaturas entre  $26^{\circ}$  y  $28^{\circ}$  C. (Morales 2007)

La precipitación media anual en la ciudad es de 760 mm. abarcando las lluvias los meses de mayo a octubre. El mes más lluvioso es julio y la menor precipitación son en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, con mayor realce en febrero a lo largo del año (INAFED 2010), presentándose ocasionalmente una sequía intraestival la cual dura entre 1 y 2 semanas. (Morales 2007)

La temperatura media mensual registrada en el parque es de  $15.8^{\circ}$  siendo los meses más cálidos marzo, abril y mayo y el más frío en enero. La precipitación anual oscila entre 700 y 800 mm. Respecto a la distribución solar o exposición a la radiación solar (solana y umbría), se concluye que el área de solana se observa en la parte este, oeste y sur de todas las laderas de las montañas y el norte son de umbría prácticamente todo el año. (Sierra et. al., 2008)

## Geología

El PESM forma parte de la llamada "Sierrita de Toluca", la cual ha sido poco estudiada desde el punto de vista geológico y geomorfológico. Sánchez -Rubio (1983) explica que la Sierrita de Toluca es resultado de actividad volcánica del Mioceno, con predominancia de rocas ígneas extrusivas intermedias, denominadas informalmente por este autor como andesita Calixtlahuaca. Este tipo de roca ha sido utilizada para extraer material para la construcción, como el caso de las minas ubicadas en la ladera noroeste del cerro Tenismo, al este del cerro Huitzila y al suroeste del cerro La Teresona en el poblado de San Mateo Oxtotitlán. (Sierra et.al. 2008).

La tectónica del Sierra Morelos, estudiada por Mooser (1996), está representada por dos fallas normales: el bloque alto se desplazó hacia abajo con respecto al

bloque de abajo. Las fallas de Agua Bendita y Tlaxomulco coinciden con una ladera abrupta en forma de un gran circo, además la primera está cortada por un barranco, pudiendo indicar un derrumbe, con longitud aproximada de 300 m y con dirección noreste-suroeste y, otra más al sureste del cerro Tenismo con longitud aproximada de 800 m con dirección noreste-suroeste. Se distinguen cuatro fracturas sobre el cerro de La Teresona: dos con dirección este-oeste, casi paralelas, otra oblicua con dirección noroeste-suroeste y, la cuarta sobre el cerro Panzón. (Sierra, 2008)

### Geomorfología

En la parte central del curso alto se encuentra la Sierra Morelos y el poblado de Calixtlahuaca situado al norte de la Ciudad de Toluca y constituida por lavas andesíticas y dacíticas principalmente. Las laderas de dicha estructura son abruptas principalmente debido al fuerte control estructural; al oriente de la sierra se identifica una estructura semicircular en forma de herradura (SEMARNAT,2011)

Se distingue una diversidad morfológica producto de la actividad endógena de origen tectónico-volcánico del terciario y, exógeno de origen fluvio-erosivo-acumulativo del cuaternario (Tabla 7). Se observan algunos cerros como Los Tejocotes, De Enmedio, Tenismo, La Teresona, Agua Bendita, Santiago Panzón, Toloche y Huitzila; estos tres últimos forman parte de una caldera llamada La Mora (Mooser, 1996). Toda esta unidad está catalogada como la más antigua del Valle de Toluca.

Así mismo, existen dos volcanes recientes (Mooser, 1996), que son: Tecaxic y Las Canoas, ambos datan del cuaternario y son contemporáneos a la última explosión del Nevado de Toluca, mismo que hizo erupción hace 11,000 años aproximadamente y rellenó el Valle con los materiales que arrojó, disminuyendo



seguramente la altura original del área. La sobreposición de las lavas andesíticas y dacíticas que conforman gran parte de la sierra dejaron una morfología singular; casos muy evidentes son los cerros La Teresona, Tenismo, Toloche, Agua Bendita y La Mora, donde se distinguen laderas escarpadas. (Sierra et. al., 2008).

Tabla 7 Unidades geomorfológicas y características del relieve del Parque Estatal Sierra Morelos

	Formas de Relieve	Localización	Características y Procesos
<b>Origen Endógeno</b>	Fallas	Al Norte del cerro Agua Bendita y Tlaxomulco Tenismo.	Son fallas normales; Las fallas de Agua Bendita y Tlaxomulco coinciden con una ladera abrupta en forma de un gran circo;
	Fracturas	Tres sobre el cerro de La Teresona; y sobre el cerro Panzón.	Las dos primeras con longitud de 2.2 m., la tercera de 2.4 km. y cuarta de 1.3 km.
	Domos	El Tejocotal, De Enmedio, Tenismo, San Marcos, La Teresona, Agua Bendita, Toloche, Santiago.	Esta forma de relieve caracteriza a gran parte de la sierra.
	Coladas de lava	Bordes del cerro La Teresona.	Proceden de lavas ácidas de alta viscosidad que recorrieron poca distancia, logrando altura y formando escarpes.
	Caldera	La Mora.	De forma semicircular con diámetro de 1.3 Km, profundidad de 160 metros y cráter abierto hacia el este.
	Laderas interior y exterior de caldera	La Mora.	Ladera interior abrupta, recta y en alguna porción cóncava y convexa.  Ladera exterior en su porción sur es recta, mientras que hacia el noroeste adquiere configuraciones cóncavas y convexas, y al norte cóncavas.

	Fondo de cráter	La Mora.	Es una depresión plana y representa el nivel donde se encontraba la cámara magmática.
	Laderas volcánicas	Tenismo, Occidente del C. La Teresona, noroeste del C. Agua Bendita.	Son producto de la formación de los domos. Sus formas van de cóncavas a convexas.
	Crestas de lava	La Mora, La Teresona y Agua Bendita.	Estas formas son rectas
	Cono volcánico de tefra	Las Canoas y Tecaxic.	Constituidos de material pirolástico, principalmente ceniza, presentan alta densidad de drenaje.
	Piedemonte volcánico	Tenismo, De Enmedio y El Tejocotal.	El primero está muy erosionado con pináculos y barrancos; los dos últimos debieron estar igual, pero se realizaron obras de conservación de suelo y agua
	Barrancos.	Sur del C. Santiago, Norte del C. Agua Bendita, Noreste del C La Teresona,  Norte del C. La Teresona y este del C. Tenismo,.	

Origen exógeno		Norte C. De Enmedio, Barrancos entre los C. Los Tejocotes y Tecaxic, Ladera entre C. Las Canoas y C. Los Tejocotes, Oeste de los C. Las Canoas y Tecaxic. Los Tejocotes, oeste del C. La Teresona.	
	Piedemonte de acumulación.	Sur de los C. De Enmedio y Los Tejocotes.	Su origen fue por la acumulación de material (arenisca) arrastrado de las partes altas de las elevaciones, principalmente por acción del agua; su pendiente es ligera.
	Abanico aluvial.	Sur de los C. De Enmedio y Los Tejocotes.	Son de pequeñas dimensiones y aportan material fino al pie de monte.
	Manto aluvial-proluvial.	Caldera de La Mora.	Pequeña franja que se extiende en dirección a la forma del cráter, formación importante en que se acumula el agua que se ha infiltrado en las partes altas y emerge en forma de manantiales
	Planicie aluvial.	En el norte y este de la sierra, corresponde a la planicie del Valle de Toluca.	Formado por clásticos como grava, arena limosa, limo, arcilla, tefra, suelo y sedimentos lacustres
	Planicie de inundación.	Sur de los C. De Enmedio, Los Tejocotes y Las Canoas.	Aparentemente esta zona se formó como causa de la actividad volcánica reciente que bloqueó la salida del agua hacia el oriente, formando una

			pequeña depresión, aprovechando sus características han construido tres bordos: Altamirano, El Llano y Ángeles.
--	--	--	---

*Fuente (Sierra et.al., 2008)*

## Edafología

Los suelos que afloran en el parque son producto de su composición geológica, así como de los procesos de rellenamiento, intemperismo y actividad humana a la que han estado sometidos. De acuerdo con el Sistema de clasificación de suelos WRB, 2006, los grupos identificados corresponden a Andosoles, Leptosoles, Feozems y Vertisoles cuyas características principales se muestran en la Tabla 8.

*Tabla 8 Grupos de suelos WRB y principales características*

Tipo de suelo	Ubicación	Características
<b>Andosol</b>	Sur del cerro de San Marcos. Cerros de Las Canoas y Tecaxic, al oeste del Parque. Porción norte y este del Parque, corresponde a la planicie del Valle de Toluca.	El Andosol, es de origen volcánico y régimen de humedad ústico, con predominio de arena; ocupa una superficie aproximada de 3.13%.
<b>Litosol</b>	Cerros Tenismo, El Tejocotal, De Enmedio, La Teresona, Agua Bendita, La Mora, Santiago, San Marcos y El Toloche. Bordes del cerro La Teresona. Lado oeste del C. La Teresona. C de Agua Bendita. Cerros Tenismo, El Tejocotal, De Enmedio, La Teresona, Agua Bendita, La Mora, Santiago, San Marcos y El Toloche. Caldera La Mora y sur del C. La Teresona.	Suelo de desarrollo incipiente y con predominio de material resistente de roca andesita. Ocupa el 82.79% de la superficie del parque
<b>Feozem</b>	Sur de los cerros De Enmedio y El Tejocotal. Oeste de La Teresona.	Son de origen aluvial-proluvial; se forman por acumulación de material arrastrado desde los sectores más elevados por la acción del agua. Estos representan el 7.3 % del Parque.
<b>Vertisol</b>	Sur de los cerros	Origen volcánico (piroclastos), tienen alto contenido de arcilla dilatante que

	De Enmedio, El Tejocotal y Las Canoas.	durante la época de estiaje forma agrietamientos que desaparecen al hidratarse; forman una topografía de gilgai y ocupan una superficie aproximada del 6.75%.
--	--	---

*Fuente: elaboración propia adaptada de Sierra (2008)*

### Hidrología

Siendo la elevación más importante del centro del Valle de Toluca, su hidrología pertenece a la subcuenca Lerma. Su caudal es intermitente, debido a la precipitación anual de 600 a 800 mm de agua que se recibe durante el año, en especial en la época de verano. La mayoría de sus vertientes son exorreicas, excepto la ubicada entre los cerros Los Tejocotes, De Enmedio y La Teresona, que desemboca en un humedal endorreico. (Sierra et. al., 2008)

Por el predominio de las formas de relieve de montaña, los ríos son jóvenes y la mayoría de primer y segundo orden. Las redes de drenaje son de tipo dendrítico, orientadas de acuerdo al parteaguas de cada elevación del Parque y son los ríos Tejalpa y San Pedro al norte de la sierra (Sierra 2008). Ambos ríos pertenecen a la subcuenca Lerma, región hidrológica No. 12 Lerma-Santiago-Chapala.(SEMARNAT 2011)

El PESM, al estar formado de lavas andesíticas y dasíticas muy fracturadas del terciario, favorece que sea permeable a la filtración acuífera; por ello, la sierra ostenta un alto valor para la recarga de mantos acuíferos.

En relación a los manantiales, tanto el carácter de las rocas, la cubierta vegetal natural y el aumento de la reforestación, han propiciado la formación de corrientes

y de manantiales tanto temporales como permanentes, que la población utiliza para diferentes usos. Existen ocho manantiales, algunos permanentes y otros activos durante la temporada de lluvias. Se localizan en el piedemonte de la ladera oeste del cerro. La Teresona; en la ladera norte del cerro Agua Bendita; en el barrio Los Pocitos; en Santiago Tlaxomulco y, en la ladera noroeste del cerro Tenismo; muy próxima a la zona arqueológica de Calixtlahuaca (Sierra et. al., 2008).

Las corrientes son aprovechadas para el llenado de los bordos Altamirano, El Llano, Los Ángeles, Doña María, uno más cerca de San Marcos y los últimos tres construidos por el Ayuntamiento de Toluca. El resto de pequeños bordos y tinajas ciegas construidos por personal del Parque, operan como obras hidráulicas para retener suelos y agua. La población local también capta esta agua de escurrimiento, habiendo construido en la ladera oeste del cerro Tenismo (Sierra et. al 2008) La importancia de estos depósitos de agua radica en que permiten la infiltración del agua hacia el manto freático, además de cumplir con el atractivo hacia los visitantes, de refugio de fauna silvestre, de abrevaderos para el ganado y algunos de ellos para el riego de agricultura y lavado de ropa. En total están identificados seis manantiales dentro de la poligonal y dos más muy cercana a ella, en la localidad de Tlaxomulco (INEGI, 2001).

En todo el parque se encuentran 21 depósitos de agua que distribuyen el líquido a diferentes colonias, barrios y localidades; cinco más se localizan sobre la sierrita de Toluca, pero fuera de la poligonal. También hay un pozo artesiano y un acueducto fuera de servicio.



### *Uso de suelo y vegetación*

El PESM pertenece a la zona metropolitana del valle de Toluca como se ha mencionado, en esta se han identificado 5 tipos de vegetación que son: bosques de clima templado subhúmedo, semifrío subhúmedo y frío, matorral, pastizal y vegetación acuática. La mayor concentración y diversidad de bosques de clima templado y frío. La vegetación predominante se localiza en las partes altas de los municipios de; Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, Toluca y Zinacantepec donde se observan bosques de pino, encino, oyamel y juníperos solos o bien asociados. También se ubican en las ANP (áreas naturales protegidas) que se dedican principalmente a la conservación de la biodiversidad y del paisaje. (SEMARNAT 2011)

El PESM muestra en su cubierta vegetal arbórea gran variedad de especies, algunas nativas y otras inducidas, esto, debido a que en los últimos 30 años, ha sido objeto de constantes reforestaciones con diferentes especies de pinos, eucaliptos, casuarinas, acacias, entre otros; los factores físicos como las condiciones fisiográficas, geológicas y climáticas también han influido en su diversidad; así como la actividad antrópica, por ser un territorio que ha sido ocupado por diferentes grupos humanos en diferentes épocas, ocasionando cambios importantes en los usos del suelo; el antecedente más lejano que dejó huella de su ocupación está representado por los Matlatzinca en la época prehispánica (Sánchez Galindo, 2005).

A continuación, se muestran las características generales de la vegetación dominante en el Parque, donde se han identificado 99 especies, mismas que se clasifican en estratos: arbóreo, arbustivo, herbáceo e hidrófilo. El estrato arbóreo lo integran tanto vegetación original como inducida:



Figura 5 Individuo de la especie *Prunus serótina* (capulín).

*Vegetación original.* La constituyen especies nativas de la región que se desarrollan aisladamente sin formar rodales importantes a excepción de los encinos arbustivos localizados en el Cerro De Enmedio. En este estrato predomina *Quercus mexicana*, *Quercus rugosa*, *Quercus frutex* y *Quercus* spp. En el PESM dicha comunidad ocupa un pequeño manchón y se distribuye por toda la sierra formando mosaicos mixtos con elementos de vegetación secundaria, con una altura que varía de 30 cm a 1 m (Sierra et.al. 2008).

Otras de las especies son encinares arbóreos son los tepozanes, capulines y ailes; su distribución depende de la presencia de suelo y se ubican por todo el Parque, en ocasiones de manera

aislada y en otras formando manchones con las especies reforestadas. Se identificaron cuatro familias y nueve especies. Las especies dominantes de ocupan el 14% respecto al total; también se le encuentra por todo el parque, asociado con otras especies (Sierra et. al., 2008).

*Vegetación inducida.* Se refiere a la que ha sido reforestada. Aunque la mayoría no es nativa de la región, forma parte del estrato arbóreo. De acuerdo a CEPANAF (1985), las reforestaciones se realizan anualmente en todo el parque y hasta el momento, los rodales tienen edad y especies distintas. De ellos *Pinus radiata* ocupa una superficie del 12.49%, que en su mayoría forma masas puras. Los eucaliptos (*Eucalyptus* sp) cubren el 19.78%, el cedro 19.8% y los pinos (*P. moctezumae* y *P. hartwegii*) el 3.96%, mientras otras especies 1.6 %.

Las reforestaciones han sido de gran importancia en la recuperación forestal de la Sierrita de Toluca, ocupando hoy día el 47.63 % respecto a la superficie total.



Figura 6 Imagen Rodal con vegetación inducida (*Pinus radiata* y *Cupressus lindleyi* )

Al realizar el estudio sobre la abundancia de la vegetación arbórea en 67 rodales, Sierra (2008), encontró que el 44.8% es alta, el 23.8% media y el 31.4% baja.

En el estrato arbustivo abunda el matorral caducifolio de encino que distribuido por toda la sierra forma mosaicos mixtos con elementos de vegetación secundaria, su altura varía de 30 cm a 1 m, y en ellos se llevan prácticas de corte para disminuir el riesgo de incendio en algunas partes (Gutiérrez, 2007) conformado por las familias *Agavaceae*, *Asteraceae*, *Cupressaceae* y algunas *Cactaceae* y *cupressaceae* entre otras. Se identificaron ocho familias y 11 especies. Su distribución amplia sin mostrar rodales de vegetación predominante.

El estrato herbáceo es disperso e irregular ocupando la mayor superficie, entre las familias identificadas están: *Cosmos bipinnatus*, *Glandularia bipinnatifida*, *Salvia reptans*, *Loesselia mexicana*, *Myriopteris aurea*, *Dyssodia pinnata*, *Reseda luteoala*, *Tagetes lucida*, *Evolvulus postratus*, *Ipomoea capillacea*, entre otras. (Naturalista 2020)

La vegetación hidrófila, aunque escasa, ocupa los cuerpos de agua permanentes y temporales del Parque, siendo comunes las siguientes familias: Lemnaceae y Marsileaceae. Otros datos sobre la cubierta vegetal, muestran que la vegetación dominante fue de carácter secundario con predominio de herbáceas y arbustivas, estado que mantuvo el Parque hasta antes de que iniciaran las reforestaciones y se controlase el libre acceso de la gente a ciertas áreas. (Sierra 2008)

En la zona del Sierra Morelos y en los cerros del Molcajete y de San Luis Mextepec existe aptitud para el bosque, pero el uso de suelo predominante es el agropecuario lo que implica deforestación en las montañas. En las zonas agropecuarias norte y

sur, así como en la zona lacustre, existe una aptitud baja para la actividad forestal. Actualmente no es posible el desarrollo de la actividad por carecer de vegetación apropiada y porque los usos agropecuarios son necesarios en estas áreas. (SEMARNAT 2011)

En la zona agropecuaria norte y sur, en la Sierra Morelos y en la zona Lacustre el cambio de uso de suelo se da de agrícola a urbano y de lacustre a urbano. El proceso de remplazo y pérdida de suelo en el territorio no urbanizable de la ZMVT disminuyó 26.7%, de 1976 a 2007. (SEMARNAT 2011)

En la tabla 9 se muestran algunas especies clasificadas por el uso que se les suele dar en su mayoría

*Tabla 9 Usos locales de la vegetación existente en el Parque Estatal Sierra Morelos*

Manutención	Combustible	Alimento	Medicinales	Otros Usos
<b>Musgo</b> ( <i>Arenaria bryoides</i> ).	Maguey ( <i>Agave atrovires</i> ).	Maguey ( <i>Agave atrovires</i> ).	Flor de peña ( <i>Sellaginela lepidophylla</i> ).	Tepozán ( <i>Buddleia sp.</i> ).
<b>Biznaga</b> ( <i>Mammillaria sp.</i> ).	Nopal ( <i>Opuntia sp.</i> ).	Nopal ( <i>Opuntia sp.</i> ).	Gordolobo ( <i>Gnapphalium oxyphyllum</i> ).	Perilla (L. <i>Distichum</i> ).
<b>Conchita</b> ( <i>Echeveria glauca</i> ).	Tepozán ( <i>Buddleia cordata</i> ).	Capulín ( <i>Prunus capulli</i> ).	Sábila ( <i>Aloe Vera L.</i> ).	Escobilla ( <i>Bacharis xonfornta</i> ).

(Sánchez, 1980) modificado por Sierra et. al., (2008)

## Fauna




La fauna era un elemento muy representativo al igual que valorado esto se observa en las construcciones del templo dedicado a Ehécatl-Quetzlacoátl, localizado en la zona arqueológica de Calixtlahuaca sobre la ladera norte del cerro Tenismo. En él se representan diferentes formas de cabeza de serpiente y coyote, fauna que en antaño posiblemente habitó estos lugares (Sánchez Galindo, 2005).

Son escasos los estudios locales sobre la fauna al interior del PESM. A lo largo de su historia, la región ha sido sometida a diferentes perturbaciones producto de su cambio de uso forestal por actividades agrícolas y ganaderas. Otra modificación drástica ocurrió durante la década de los cincuenta en el siglo pasado, al desecarse las lagunas de Lerma, lo cual modificó radicalmente los hábitats naturales, a grado tal que la fauna quedó expuesta a un gran desequilibrio, desapareciendo algunas especies como el coyote (*Canis latrans* sp.); mientras que otras fueron reemplazadas por fauna traída por el ser humano como el gorrión común (*Carpodacus mexicanus*) y el pájaro negro (*Cassidix mexicanus*).

Como una muestra de la fauna sin ser nativa del lugar, se encuentran en cautiverio venados de cola blanca (*Odocoileus virginianus*) ocupando 2.8 ha (Sánchez Galindo, 2005). Actualmente, se reportan un total de 62 especies de vertebrados, distribuidos 4 Clases: Amphibia, Reptilia, Aves y Mamalia. Para la clase Amphibia se registrarán dos familias con una especie cada una; una de crustáceos y otra de artrópodos. Es factible que exista más fauna, el problema es la falta de estudios que permitan contar con un inventario reciente y más completo. En la Tabla 10 se muestran algunas de las especies reportadas dentro de la zona.

Tabla 10 Fauna reportada dentro de la zona

Especie	Nombre común	Imagen
<b>Ardea alba</b>	Garza blanca	 <p data-bbox="841 699 1279 772">Figura 7 Imagen Fuente: Naturalista 2021</p>
<b>Melospiza melodia</b>	Gorrión melódico	 <p data-bbox="849 1020 1284 1094">Figura 8 imagen Fuente: Naturalista 2018</p>
<b>Phrynosomatidae</b>	camaleón	 <p data-bbox="846 1331 1227 1362">Figura 9 Imagen fuente: Propia</p>
<b>Sceloporus torquatus</b>	Lagartija espinosa de collar	 <p data-bbox="821 1619 1333 1650">Figura 10 Imagen fuente: Naturalista 2018</p>

<b><i>Ischnura denticollis</i></b>	Caballito pigmeo	 <p data-bbox="834 562 1344 596"><i>Figura 11 Imagen fuente: Naturalista 2018</i></p>
<b><i>Fulica americana</i></b>	gallareta	 <p data-bbox="834 823 1344 856"><i>Figura 12 Imagen fuente: Naturalista 2021</i></p>
<b><i>Colubridae</i></b>	Culebra	 <p data-bbox="889 1117 1279 1150"><i>Figura 13 Imagen fuente: propia</i></p>

*Fuente: elaboración propia con base en diferentes fuentes y documentación en trabajo de campo*

En general, el parque se ha convertido en un hábitat y refugio para diferentes organismos, lo que indica que aun cuando la superficie protegida es apenas del .2.9% del municipio, resguarda una cantidad considerable de biodiversidad que aun cuando son unas cuantas hectáreas protegidas, existe gran variedad de fauna; no obstante, algunos organismos se encuentran en categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2001, entre ellos están la rana verde (*Hyla* sp), reportada como amenazada y el camaleón (*Phrynosoma* sp). reportado en peligro de extinción.



El área al ser decretada como parque, ha sido objeto de diferentes trabajos de recuperación de suelo y agua, y entre ellos las reforestaciones, que en la actualidad cubren 47.63%, lo cual ha repercutido positivamente en la fauna silvestre al incrementarse el espacio de su hábitat permanente o temporal; caso específico la construcción de nuevos bordos, ha permitido que aves migratorias como: garzas, pato golondrino, pato bocón, cerceta azul, verde y café (CEPANAF, 2014).

En cuanto a los usos de la fauna silvestre, predomina la cacería de conejo (*Sylvilagus floridanus*) y captura de aves canoras como: el gorrión común (*Carpodacus mexicanus*) y cuitlacoche (*Toxostoma curvirostre*); otras especies como el colibrí son considerarlas mágicas, mientras que el conejo y el acocil son utilizadas como alimento.

### Contexto histórico y socioeconómico

En el PESM existen diferentes conflictos debido al uso de suelo y delimitaciones del polígono, en donde en algunos partes aun pertenecen a terrenos ejidales. Se puede apreciar que la mayor parte de la superficie no pertenece al sector público, lo que conlleva problemas de situación de manejo y que no sea se pueda llegar a una gestión más eficiente dentro del parque; por otra parte, estos conflictos sociales también contribuyen a la degradación del espacio y como se nos comentó en la visita a campo a la inseguridad que se presenta dentro del mismo en las zonas más altas.

Las actividades agrícolas en el PESM comprenden el 5.80% de la superficie y se caracterizan por el uso tradicional de terrazas, las que según algunos arqueólogos del INAH (comunicación personal) son de origen prehispánico. Muchas de ellas

continúan siendo productivas, sembrándose con maíz, frijol, haba, calabaza, papa, trigo, magueyes y nopales (INAFED 2010). En 1980 la superficie ocupada por las terrazas era de 3'640,347 m<sup>2</sup>, para el año 2000 esta superficie disminuyó a 2'377,236 m<sup>2</sup>, equivalentes al 34.5%. Actualmente, algunas terrazas han sido reforestadas o urbanizadas, no obstante, la mayoría muestra signos de abandono ya que se encuentran cubiertas por vegetación secundaria (Sierra et. al.,2008)De acuerdo con el plan de ordenamiento ecológico de la ZMVT el PESM continuará siendo superficie forestal, sin embargo, experimentará una disminución paulatina de sus áreas agrícolas, las cuales cambiarán el uso del suelo hacia tipologías urbanas. Debido a la aptitud urbana que predomina en las zonas aledañas fácilmente habrán de ubicarse nuevos desarrollos habitacionales que buscarán aprovechar la proximidad al parque estatal Sierra Morelos. (SEMARNAT, 2011)

En cuanto a la producción ganadera únicamente el 1.65% del total de la población aledaña se dedica a esta actividad, básicamente con fines de autoconsumo. (Sierra et. al., 2008). Si bien las actividades agropecuarias cubren una mínima parte de la superficie del parque, éstas son fuente de conflicto entre los productores y el personal del parque dedicado al mantenimiento ya que el ganado no permite el desarrollo de los individuos más jóvenes de árboles, además de que el paso de los mismos por el parque sin respetar los límites de ejido y zonas del parque provocan una compactación y degradación del suelo.

## Metodología

Dentro de este capítulo se explica la metodología que se utilizara para obtener la información necesaria para la elaboración del presente trabajo de tesis. La Figura 12 muestra de manera esquematizada la estructura de la metodología que siguió el presente trabajo:

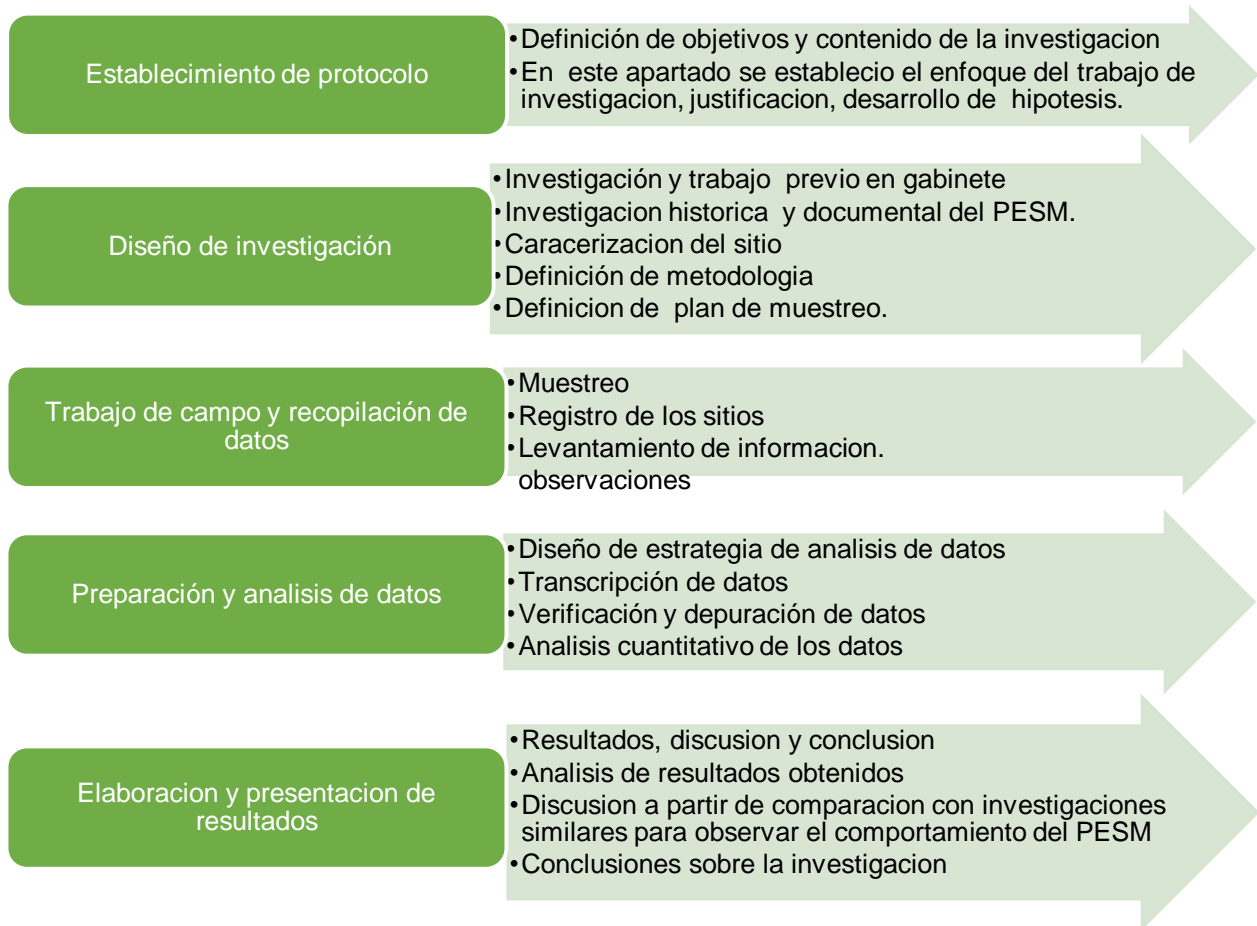


Figura 14 Diagrama de la metodología empleada para la investigación

En primer orden se llevó a cabo el planteamiento del protocolo y trabajo de gabinete como planteamiento del problema, objetivo, marco referencial, y área de estudio, de la cual se elabora una caracterización basada en información documental y trabajo de campo principalmente de identificación de especies de árboles.

Por otra parte, se eligieron distintos puntos de muestreo dentro de PESM considerando su año de reforestación o forestación, obtenido a partir de la información proporcionada por el personal que labora en el PESM y posteriormente se hicieron recorridos de campo para verificar las condiciones de cada sitio. Finalmente se obtuvieron siete puntos para el periodo 1985 – 2012. Los puntos fueron georreferenciados y ubicados mediante cartografía de elaboración propia (Figura 9). La tabla 11 muestra la información para cada sitio.

Tabla 11. Ubicación y año de plantación de los sitios de estudio

Sitio	Año de reforestación	Ubicación (Coordenadas UTM)	
		X	Y
1	2012	426,904.2	2,135,309.4
2	2010	427,686.8	2,135,471.9
3	2000	426,325.1	2,135,460.9
4	1995	427,687.7	2,135,472.7
5	1990	426,854.2	2,135,554.4
6	1990	426,753.3	2,135,685.1
7	1985	427469.3	2135,554.8

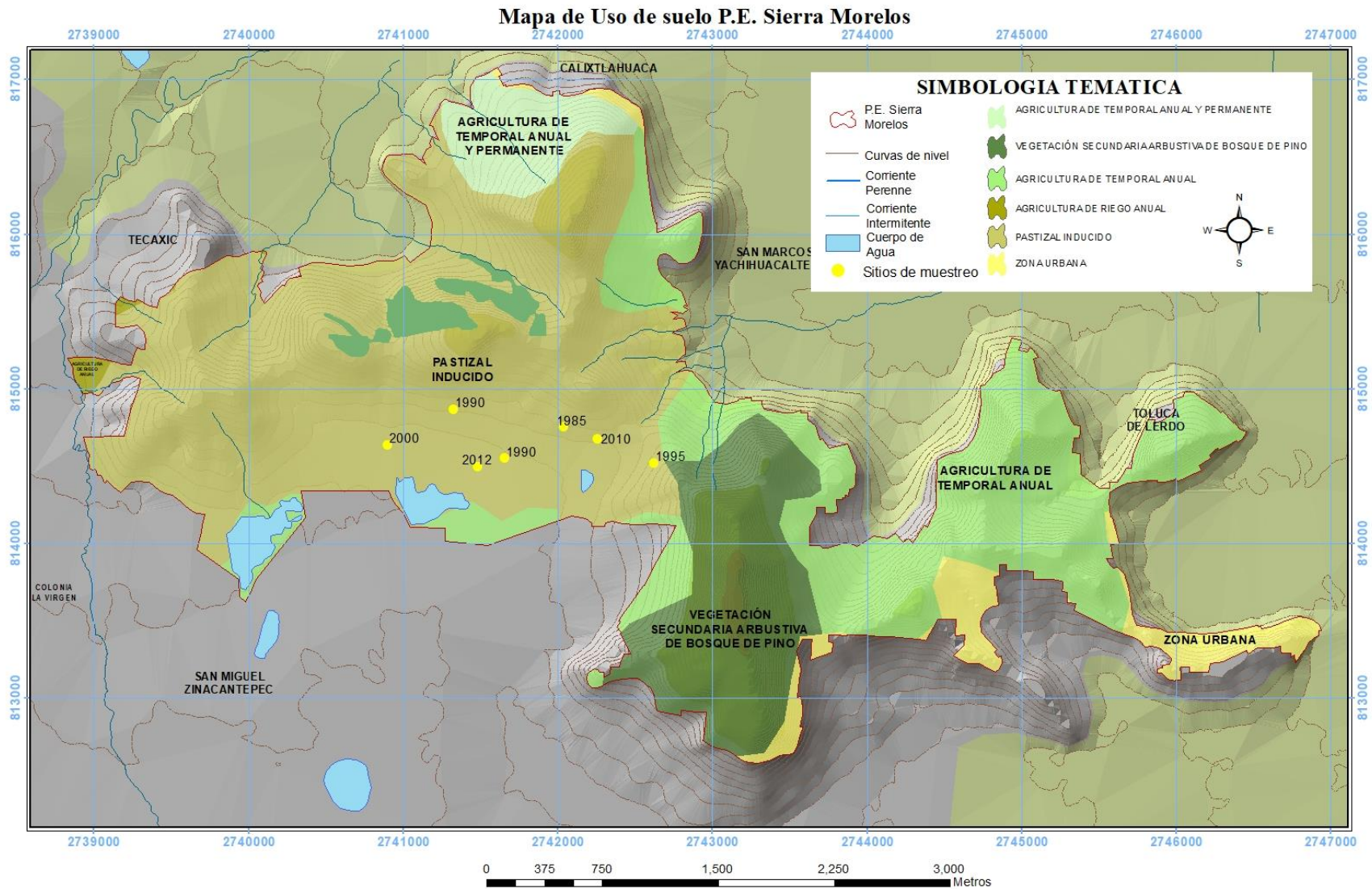
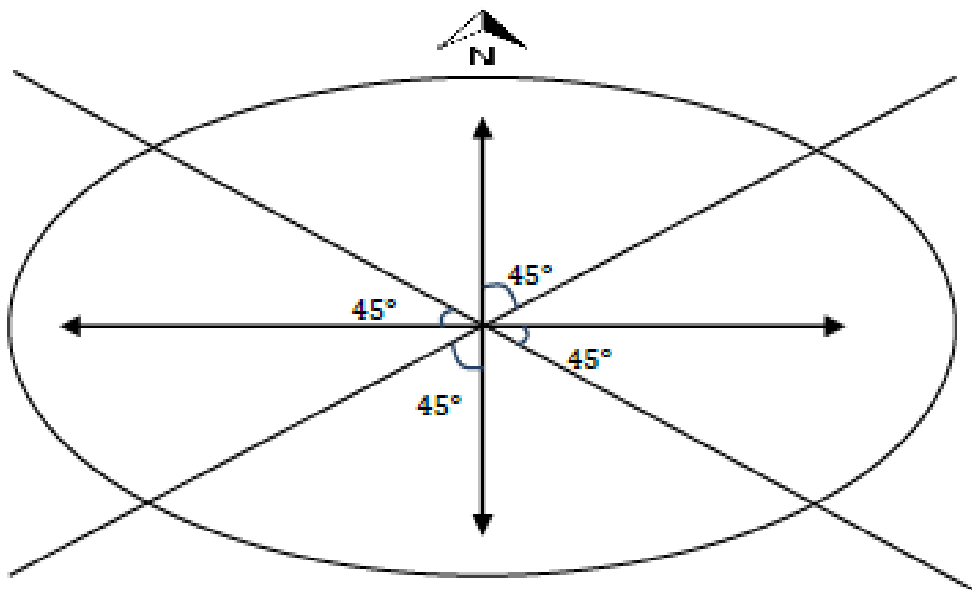


Figura 15 Mapa uso de suelo y ubicación de sitios por fecha de plantación,  
Fuente elaboración propia con fuente en INEGI

El levantamiento de información dasométrica se basó en el método propuesto por el Programa Mexicano de Carbono (2015), desarrollado para estudios semi cuantitativos a nivel regional, modificando la superficie de muestreo para esta investigación.

#### Diseño de transectos

En campo, para ubicar el área de muestreo se empleó el método del transecto consistente en colocar cuerdas separadas por  $45^\circ$ , para ello se utilizó una brújula para iniciar el conteo de los individuos a partir del centro del sitio hacia afuera iniciando con orientación norte y continuar a favor de las manecillas del reloj hasta cubrir los  $360^\circ$  del área (PMC, 2015). Se extiende la segunda cuerda a  $180^\circ$  con respecto a la primera. La tercera y cuarta cuerdas se extienden a  $90^\circ$  de las cuerdas 1 y 2. Las siguientes cuatro cuerdas se extienden a  $45^\circ$  de las cuerdas 1 a 4. Se efectúa recorriendo el transecto hacia la orientación de la línea de muestreo y se registraron los árboles del área ubicada en un círculo de  $1000\text{m}^2$ .



*Figura 16. Colocación de las cuerdas para transecto*

Una vez delimitada la superficie de muestreo (1000 m<sup>2</sup>), se registró el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de todos los arboles dentro del circulo superiores a los 130 cm, iniciando con orientación norte para continuar a favor de las manecillas del reloj hasta cubrir los 360° del área (PMC, 2015), la información se recabo en formatos como el que se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Formato de registro de Información

No Individuo	Especie	Circunferencia (cm)	Altura (m)	Daño (Evidencias)

El tipo de daño se registró de acuerdo a lo observado bajo los siguientes criterios

Tabla 13 Criterios de daño en individuos arbóreos

clave	Daño	Descripción
1	Ausencia de daño	El árbol o arbusto no presenta evidencia de daño físico o causado por plagas o enfermedades
2	Daño humano directo	El individuo manifiesta heridas causadas por el hombre tales como calas ocoteo y cinchada todos ellos con el fin de obtener un producto o eliminación del árbol o arbusto

3	Plantas parasitas	La presencia de estas plantas es notoria por las deformaciones que causan en el tronco o por las coloraciones del follaje generalmente producidas por matapalo. No deberán confundirse con plantas epifitas
4	incendios	Presencia de carbonización en troncos y ramas a desecación y pérdidas del follaje
5	insectos	Se manifiesta por escurrimientos de resina o látex en fuste y ramas presencia de aserrín o caída de hojas o ramas defoliadas por qué se las comen los insectos defoliadores.
6	Viento	Se observan árboles descopados o con ramas desgajadas a consecuencia del embate del aire, el individuo puede estar doblado por acción de huracanes
7	enfermo	se observan manchas causadas principalmente por hongos los daños se presentan como deformaciones protuberancias de los troncos ramos o frutos
8	roedores	Daños en la Corteza conos o frutos y semillas y otras partes causadas por ardillas y ratones principalmente
9	pastoreo	Se observa ramoneo en hojas y ramas
10	aprovechamiento	Registro de manejo presencia alta de tocones y marcas de manejo sellos de pintura verde o cal
11	Rayos	El individuo está partido hasta el suelo y queda registro de fuego sobre el mismo
12	Otros	Evidencia de rasguños de mamíferos

*Fuente: PMC, 2015.*



Una vez obtenida la información necesaria en campo para la estimación de los almacenes de carbono se realizó el cálculo de las reservas de carbono en biomasa mediante la aplicación de modelos alométricos para cada especie (Tabla 14).

Tabla 14 Ecuaciones alométricas de especies que conforman el estrato arbóreo en el PESM

Especie	Ecuación alométrica	Estado	Autor
<b><i>Pinus patula</i></b>	$[0.0948 * [DAP^{2.4079}]$	Tlaxcala	Diaz, 2005
<b><i>Cupressus</i></b>	$[.5266] * [DAP^{1.7712}]$	Estado de México	Vigil, 2010
<b><i>Pinus moctezumae</i></b>	$[0.013] * [DAP^{3.046}]$	Estado de México	Bonilla, 2009
<b><i>Eucalyptus</i></b>	$[2.497]^{[DAP^{0.1766}]}$	Oaxaca	Toribio, 2006
<b><i>Fraxinus uhdei</i></b>	$[362.129] * [[3.1416] * [[DAP^2/4]]^{1.100}]$	Distrito Federal	Cano, 1994
<b><i>Pinus radiata</i></b>	$[0.02.47] * [DAP^{2.47}]$	Chiapas	Ayala, 2001

Fuente: elaboración propia con base en García et., al. (2015)

En la figura 17 se explica el método seguido para la aplicación de los modelos alométricos establecidos por especie; cada modelo tiene su adecuación, pero todos se manejan bajo el mismo fundamento.

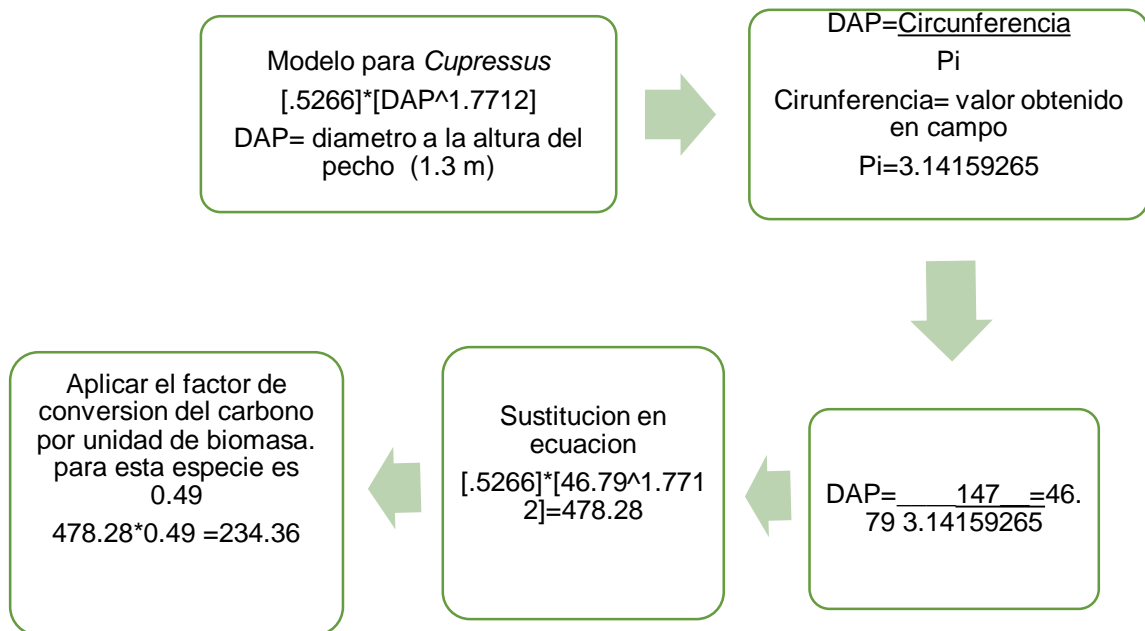


Figura 17 Procedimiento para la aplicación de los modelos alométricos en especies arbóreas

## Capítulo III Resultados

### Caracterización de los sitios de muestreo

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los sitios muestreados.

#### Sitio 1-1985.

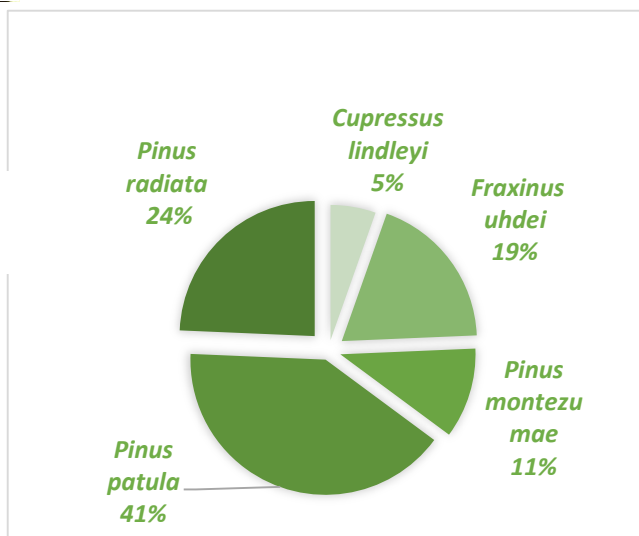
El sitio 1 está conformado por reforestaciones de *Cupressus lindleyi*, *Fraxinus*



Figura 18. Panorámica del sitio 1

*uhdei*, *Pinus montezumae*, *Pinus patula* y *Pinus radiata*. Es el sitio más antiguo muestreado, por lo que los individuos son de diámetros más grandes con DAP de hasta 55.7 cm y alturas de máximas de 15 m. Por otro lado, en este sitio se encontraron 11 individuos con daño de incendio y 1 muerto en pie. También se logró observar una regeneración natural con árboles menores de 1m de altura aproximadamente por lo que no se contabilizaron para el muestreo muy favorable para el sitio

Figura 19 Distribución porcentual de especies para el sitio 1.



### Sitio 2-1990



Figura 20. Panorámica del sitio 2.

En el sitio 2 se encontraron las especies *Cupressus lindleyi*, *Pinus patula* y *Pinus radiata*, con individuos dentro de un rango de 2 a 12 de altura. Existen individuos en el estrato arbustivo no dimensionados para efecto de este estudio. No se identificaron alteraciones en la cubierta vegetal producto de incendios o tala furtiva. La mayor abundancia se obtuvo para *Cupressus lindleyi*, siendo también los de mayor altura. Este sitio entra en los predios concedidos a organizaciones civiles de acuerdo con el personal administrativo.

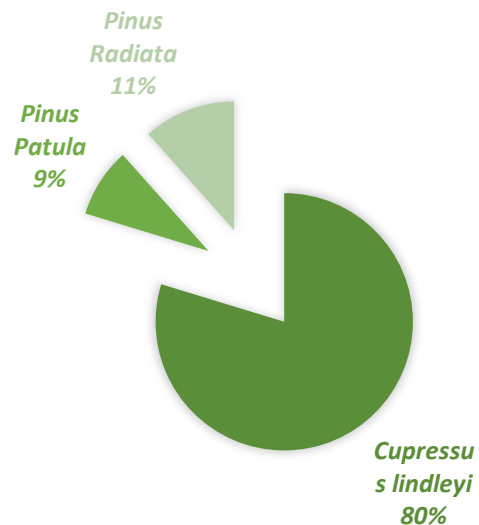


Figura 21. Distribución porcentual de especies arbóreas para el sitio 2

### Sitio 3-1990



Figura 22 Panorámica del sitio 3.

Para el tercer sitio se eligió el año de 1990, ya es un año en el que la campaña de reforestación cubrió una superficie importante dentro del PESM. Las especies empleadas fueron: *Cupressus lindleyi*, *Fraxinus uhdei* y *Pinus montezumae*. Los individuos arbóreos tienen un rango de alturas entre 2 y 15 m y DAP máximo de 40 cm. Se observaron 22 individuos con daños por rayos y 2 muertos en pie.

Como se observa en la figura 18, para este rodal el *Pinus Moctezumae* fue la especie con mayor dominio y a pesar de ser un sitio

relativamente antiguo los individuos con rangos de diámetro no mayores a 20 cm también mostraron mayor abundancia (figura 19).

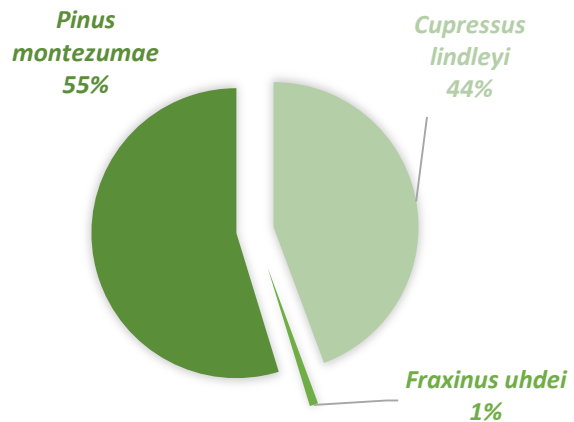


Figura 23 Distribución porcentual de especies para el sitio 3

#### Sitio 4-1995



Figura 24 Panorámica del sitio 4

La reforestación realizada en 1995 constó únicamente de *Cupressus lindleyi* y es un sitio bastante poblado de donde el DAP del mayor registrado fue 29.60 cm y el mayor número de individuos ronda por debajo de los 20 cm, con alturas aproximadas de entre 7 y 17m. Se infiere que en el sitio no había arboles antiguos mayores ya que todos están en rangos similares de promedio tanto altura como grosor. Por otra parte, de encontraron individuos dañados por causas naturales (descargas eléctricas, plagas) o antrópicas (pastoreo, tala, daño físico directo). Rodales como el que corresponde a este sitio identifican plenamente el efecto de las campañas de reforestación monoespecíficas con especies como la mencionada que contribuyen en menor medida a la protección del suelo debido a la condición de baja degradación de la hojarasca que producen, por lo que son evidentes indicios de erosión hídrica laminar y en pequeños surcos.

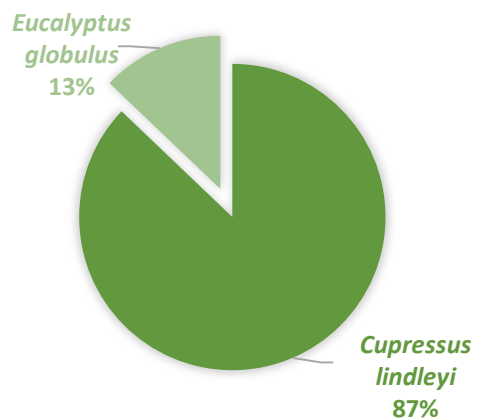
## Sitio 5-2000



Figura 25. Panorámica del sitio 5.

En el sitio 5 se encontró reforestación con las especies *Cupressus lindleyi* y *Eucalyptus globulus*. La campaña de reforestación del año 2000 fue de las últimas en emplear al eucalipto para tal fin, los indicios mostraron que antes de este año ya existían individuos aislados de esta especie, ya que se encontraron árboles con altura mayores a 20 metros, superiores al promedio. A pesar de que el eucalipto es la especie más antigua en el parque en el uso de las reforestaciones, el cedro continúa siendo la especie más abundante. Al igual se observaron tocones de eucalipto en donde la finalidad era remover los individuos. El daño en este sitio solo se registró por causas naturales.

Figura 26 Distribución porcentual de especies para el sitio 5



### Sitio 6-2010

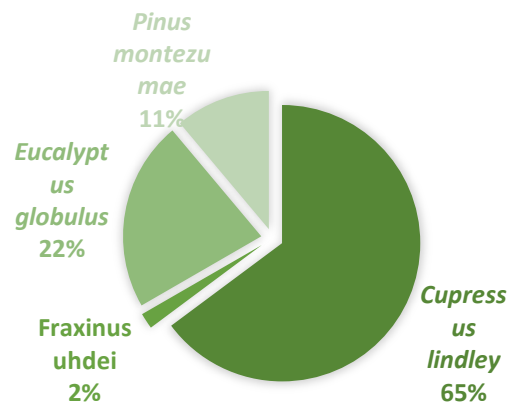


El sitio 6 contó con una mayor variación de especies en donde se encontraron *Cupressus lindleyi*, *Fraxinus uhdei*, *Pinus montezumae*, *Eucalyptus globulus*. De acuerdo con lo informado por el personal que labora en el PESM, algunos de los individuos de mayor altura superior a los 15 m aproximadamente ya se encontraban en el sitio anterior a la reforestación por lo que son pocos los registrados, la mayoría se sitúa por debajo de los 20 cm, como se observa en la figura panorámica. Para este rodal solamente se encontró 1 árbol con daño por rayo y en algunos se observaron

Figura 27. Panorámica del sitio 6

casas para aves, las cuales no generan ninguna alteración.

Figura 28 Distribución porcentual de especies para el sitio 6





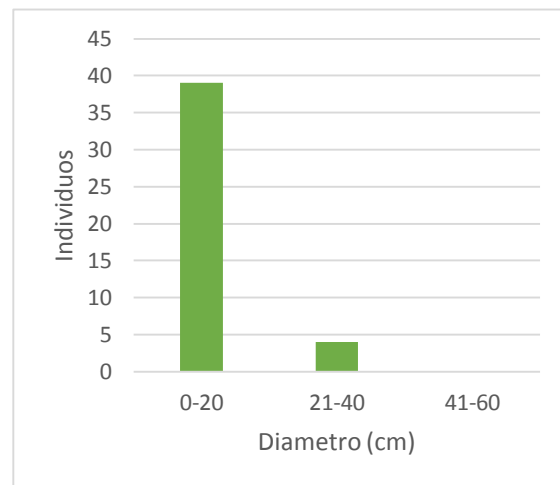
## Sitio 7-2012



Figura 29 Panorámica del sitio 7

El sitio 7 es el de más reciente en reforestación, aquí se encontró únicamente individuos de *Cupressus lindleyi* con alturas de entre 1.3 y 13 m, predominando individuos con diámetros inferiores a 20 cm. Por la presencia de árboles emergentes se infiere que antes de la reforestación la densidad arbórea era escasa, esto ha sido benéfico para la reforestación debido a que estos individuos mayores crean zonas de protección para las plántulas. Por otra parte, en el área se encontraron 8 árboles dañados por incendio y solamente uno muerto en pie.

Figura 30 Distribución de individuos por DAP para el sitio 7



## Evaluación de la estructura de los sitios de estudio

### Densidad arbórea

Como se puede apreciar en la Figura 31, la reforestación realizada en el año de 1995 cuenta con la mayor densidad arbórea estimada a partir del muestreo realizado y extrapolado a una hectárea (1330 individuos), cuyo valor se encuentra dentro de los estándares establecidos en las campañas de reforestación. En contraparte, el sitio reforestado en 1985 cuenta apenas con 370 Ind/ha, siendo el más bajo a pesar de ser el más antiguo.

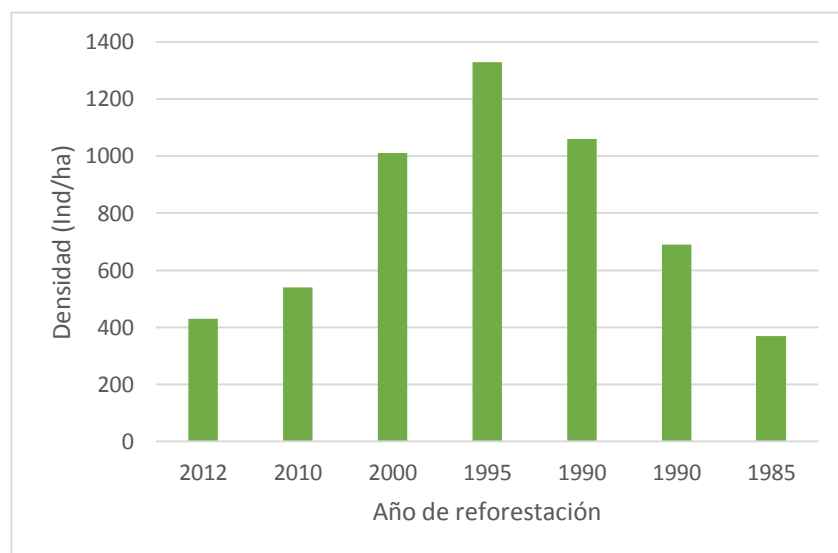


Figura 31 Densidad arbórea para los diferentes sitios de estudio.

### Características dasométricas de los rodales

En la siguiente tabla se realizó la caracterización de los rodales muestreados considerando la especie y su DAP; esta información es útil para apreciar la estructura y conformación de las masas forestales por segmentos. Un dato importante e inherente a casi todos los rodales estudiados que se puede obtener a partir de esta información es el amplio rango de diámetros del tronco lo cual se considera que es indicio del repoblamiento con individuos juveniles a través de campañas subsecuentes de reforestación, aunque en algunos casos también podría haber un repoblamiento natural (situación que no podemos constatar).

**Tabla 15 Caracterización de rodales por año de reforestación**

Sitio	Especie	Individuos	DAP* cm
<b>7-2012</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	43	9.0 – 21.0
<b>6-2010</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	35	1.50-57.5
	<i>Fraxinus uhdei</i>	1	4.50
	<i>Eucaliptus globulus</i>	12	7.0 – 45.0
	<i>Pinus montezumae</i>	6	7.0 – 35.0
<b>5-2000</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	88	2.0 - 28.5
	<i>Eucaliptus globulus</i>	13	4.0 – 24.0
<b>4-1995</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	133	2.0 -29.6
<b>3-1990</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	47	1.5 - 40.5
	<i>Fraxinus uhdei</i>	1	6.3
	<i>Pinus montezumae</i>	58	3.5 - 39.8

<b>2-1990</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	55	0.6 - 13.4
	<i>Pinus patula</i>	6	7.3 - 29.3
	<i>Pinus radiata</i>	8	2.5 - 26.1
<b>1-1985</b>	<i>Cupressus lindleyi</i>	2	46.7 - 54.2
	<i>Fraxinus uhdei</i>	7	0.6 - 20.7
	<i>Pinus montezumae</i>	4	1.9 - 21.0
	<i>Pinus patula</i>	15	2.8 - 55.7
	<i>Pinus radiata</i>	9	1.5 - 51.0

\*DAP: Diámetro a la altura del pecho = 1.3 m

Como se puede apreciar, existen diferentes especies con las que se llevaron a cabo las reforestaciones en cada sitio. En el año 2012 (el más reciente) no muestra una gran diferencia en su estructura de diámetro ni de especies al ser relativamente joven ya se contaban con planes más establecidos de reforestación y forestación

Para el año 2010 que es el segundo sitio más joven, se puede notar que el menor diámetro registrado fue de 1.59 cm mientras que el mayor de 57.3 cm, esta diferencia dada la edad aproximada de las especies deducida por el año de plantación probablemente se deba a que ya existían arboles mayores antes de la reforestación lo que beneficia a la misma dando un soporte a los más jóvenes contra lluvias fuertes y las constantes heladas que existen en la ciudad, además de que la variabilidad en la estructura beneficia al repoblamiento natural. Esto mismo sucede durante para las reforestaciones de los años 2000, 1995 y 1990

Por otra parte, considerando al sitio más antiguo tomado para este trabajo que es del año 1985, la diferencia de diámetro se le podría atribuir mayormente a campañas sucesivas de repoblamiento y reemplazo de los individuos muertos por causas

naturales o antrópicas, ocasionando un repoblamiento con individuos más jóvenes con lo observado en campo en donde todas las especies existentes a excepción del fresno (*Fraxinus uhdei*) cuentan con individuos mayores cuyo diámetro rebasa los 50 cm pero en cuanto a la densidad este mismo fue el que obtuvo el valor más bajo

En la siguiente grafica se puede se puede apreciar el diámetro promedio comparado con el año de muestreo, en donde se observa que a mayor antigüedad del sitio mayor es la media del diámetro. A excepción del año 2010 en donde hay una disminución considerable de esta variable (Figura 32).

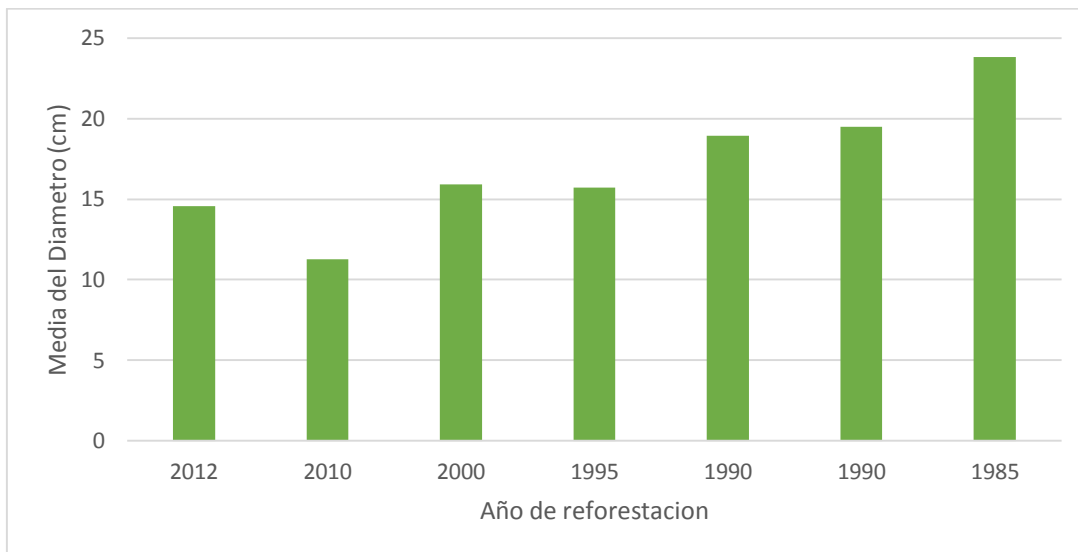


Figura 32 Diámetros promedio para cada sitio de estudio.

Por otra parte, se diseñó un gráfico de comparación por especie y año de la media de diámetro para observar cual especie es la que ha tenido un mayor incremento

en su diámetro y cual almacena mayor cantidad de CO<sub>2</sub> en el mismo periodo de tiempo.

La Figura 33 muestra como la especie que mayor diámetro alcanzo en el periodo de tiempo de 1985 a 2012 fue el cedro lo que indica que su crecimiento es relativamente rápido y la especie que alcanza menores tallas fue el fresno, por otra parte, el eucalipto también mostró un crecimiento acelerado a pesar de no contar con tantos individuos en todos los sitios muestreado.

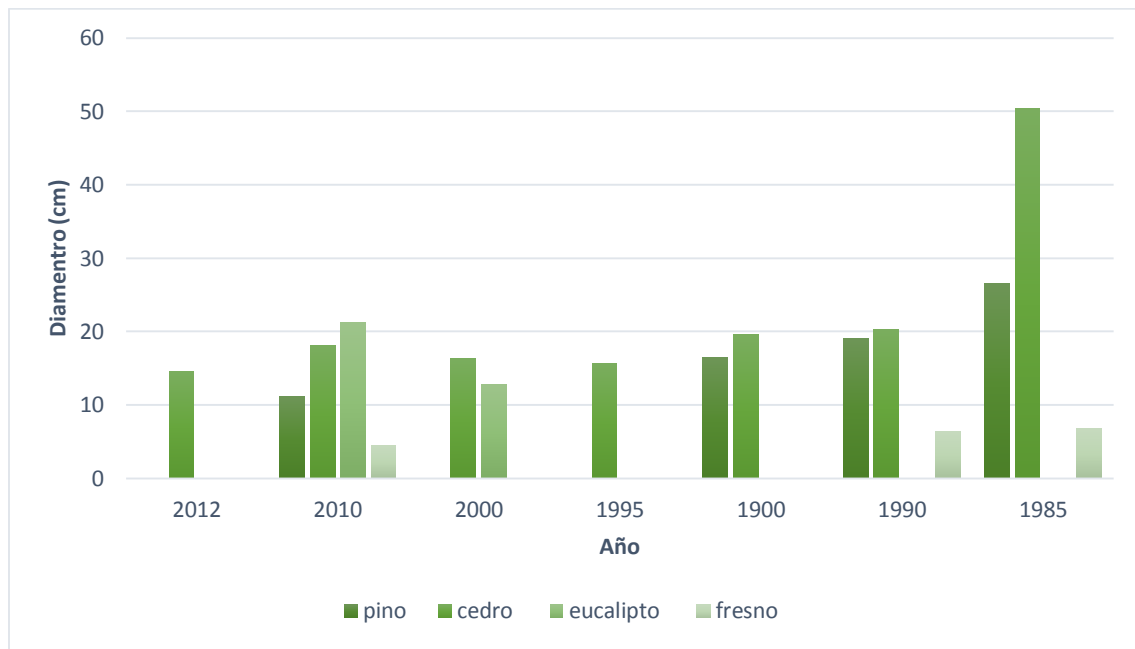


Figura 33 Grafica media de diámetro por especie y año

Para ejemplificar de manera más detallada este hecho se realizaron dos gráficas para las especies de mayor distribución en las que se logró obtener datos en varios de los sitios muestreados para así hacer una comparativa, estas fueron el cedro y

el pino. El cedro se encontró en todos los sitios muestreados y el pino únicamente en 4 de ellos.

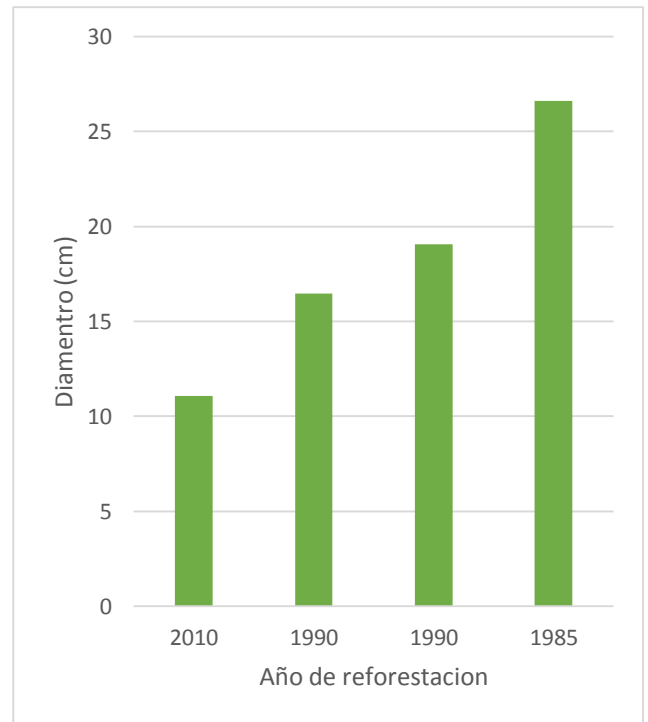
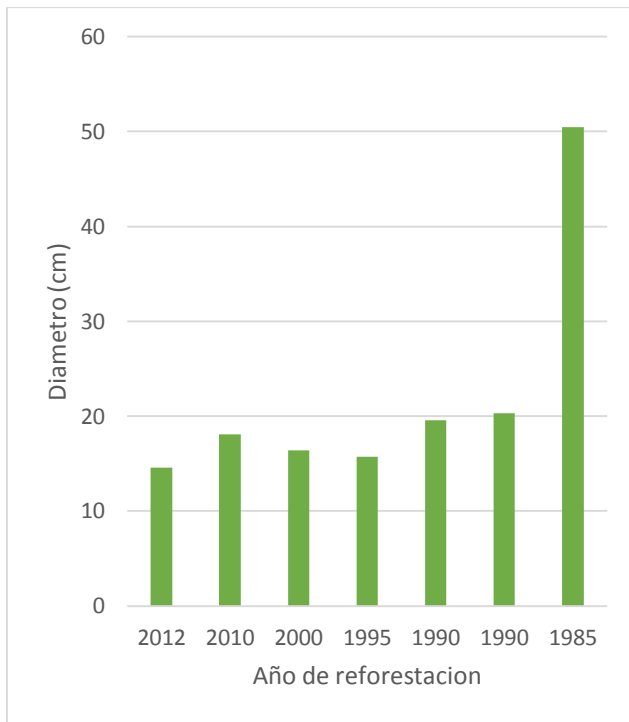


Figura 35 DAP promedio para individuos del género Cupressus

Figura 34 DAP promedio para individuos del género Pinus.

El comportamiento del valor de DAP en ambas especies fue similar pero el cedro, como se observa (Figura 35), tuvo un mayor crecimiento con individuos que en promedio alcanzan los 50 cm de diámetro en la fecha más antigua, mientras que el pino apenas rebasa los 25 cm (Figura 34).

## Reservas de carbono

### Reservas de carbono por año de plantación

En la Tabla 16 y Figura 36 se observan los reservorios de carbono en la biomasa arbórea para los siete sitios estudiados dentro del PESM. Como se puede apreciar, el patrón de almacenamiento se incrementa en función de la edad de plantación. Al mismo tiempo, los resultados muestran que la tasa de captura en biomasa es muy baja desde el año 1995 al 2012

*Tabla 16 Reservas de carbono por año de plantación.*

Año de plantación	Biomasa arbórea Mg C /ha *
2012	1.49
2010	2.68
2000	3.86
1995	4.85
1990	7.35
1990	8.67
1985	22.97

- Los datos fueron extrapolados a partir de una superficie de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>



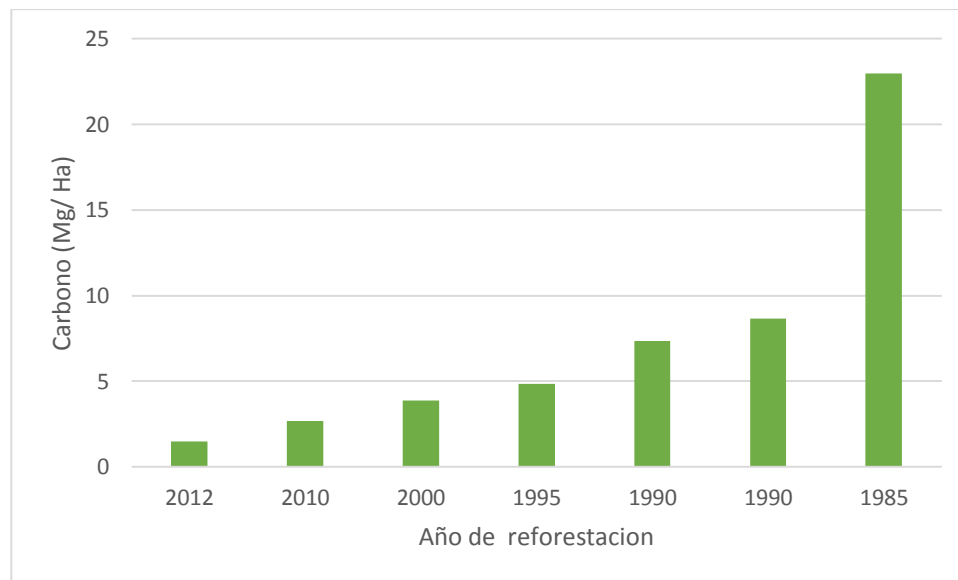


Figura 36 Grafica reservas de carbono en biomasa arbórea

### Tasas de captura por especie en función del tiempo

Para poder observar a detalle la tendencia en la captura de carbono en función de la especie y del tiempo se realizaron diferentes graficas en las que fue posible observar este comportamiento y así realizar una estimación de cuál ha sido la especie que mayor carbono ha capturado; cabe mencionar que este comparativo se realizó en el caso de *Cupressus*, dado que es la única especie con representación para todos los sitios (Figura 37).

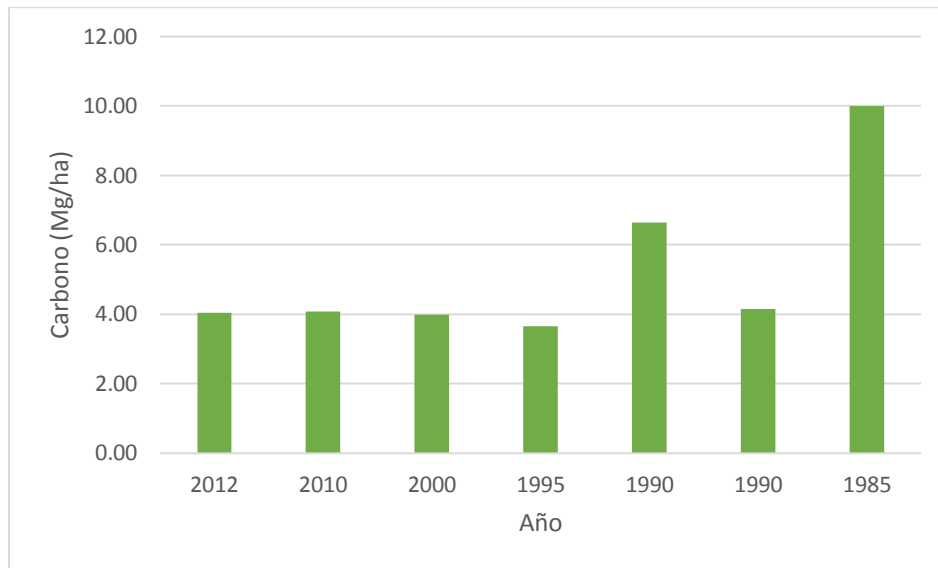


Figura 37 Estimación de las reservas de carbono para *Cupressus lindleyi* periodo 1985-2012

Por otra parte, la Figura 38 muestra la tasa de captura para individuos del género *Pinus* (presente en 4 de los 7 sitios). Se observa que para el año 2010 los registros muestran una tasa de captura considerablemente baja, esto podría deberse a diferentes factores que no es posible determinar en esta investigación y que podrían deberse entre otras cosas a bajas tasas de sobrevivencia, eventos catastróficos naturales o provocados como es el caso de heladas tempranas, incendios, pastoreo, etc. Sin embargo, es preciso mencionar que se trabajó con sitios representativos de las diferentes etapas de repoblamiento vegetal y que solo representan una fracción del universo de muestreo en el que las condiciones de sobrevivencia y crecimiento pudieran diferir de lo aquí expuesto.

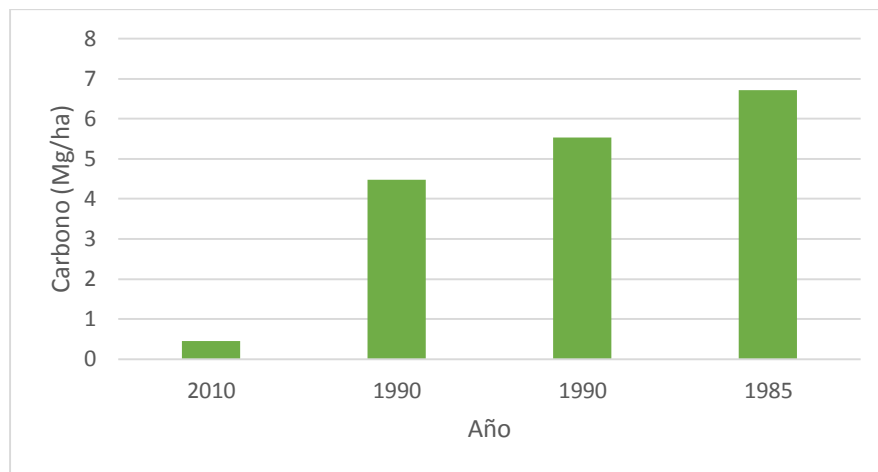


Figura 38 Estimación de las reservas de carbono para Pinus en el periodo 1985-2012

En la Figura 39 se observa de forma integrada la contribución de las principales especies arbóreas sobre el almacenamiento del CO<sub>2</sub>.

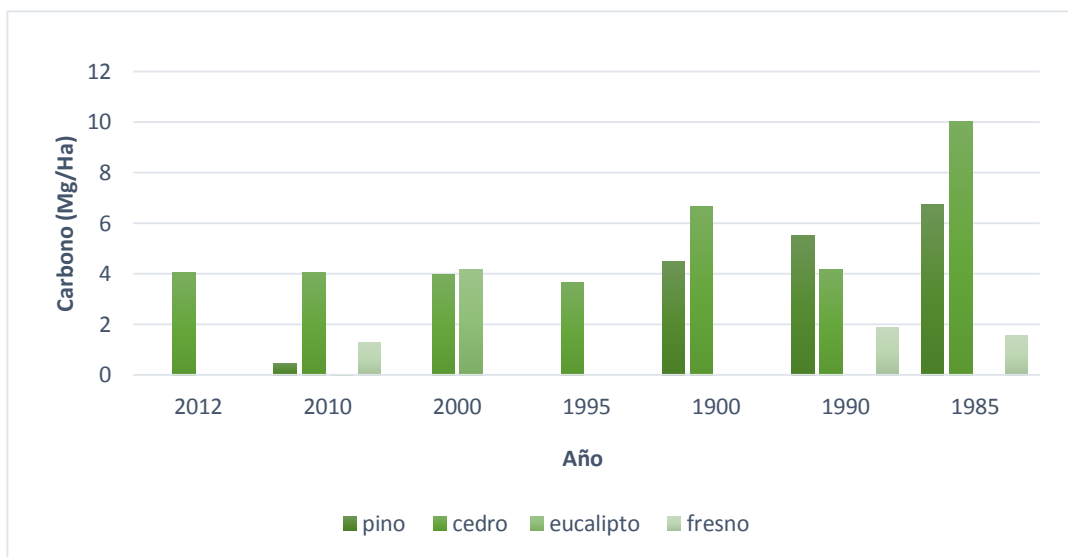


Figura 39 Grafica comparacion de captura de CO<sub>2</sub> por especie

Por último, en la Figura 40 se muestra el porcentaje de carbono almacenado por especie con respecto al total de sitios, este dato se obtuvo con la media de cada sitio por especie para poder apreciar mejor el comportamiento y que no se genere un sesgo muy grande en cuanto el número de individuos. El cedro resultó ser nuevamente la especie que mayor almacenamiento para la totalidad de los sitios de muestreo dentro del PESH, mientras que el fresno y el eucalipto fueron las especies con la menor proporción de carbono almacenado. Cabe recalcar que, al comparar con las gráficas anteriores, es preciso observar que una gran parte de los individuos de fresno son jóvenes, mientras que el para el eucalipto está compuesto por individuos maduros, lo cual identifica la transición de especies durante las campañas sucesivas de reforestación.

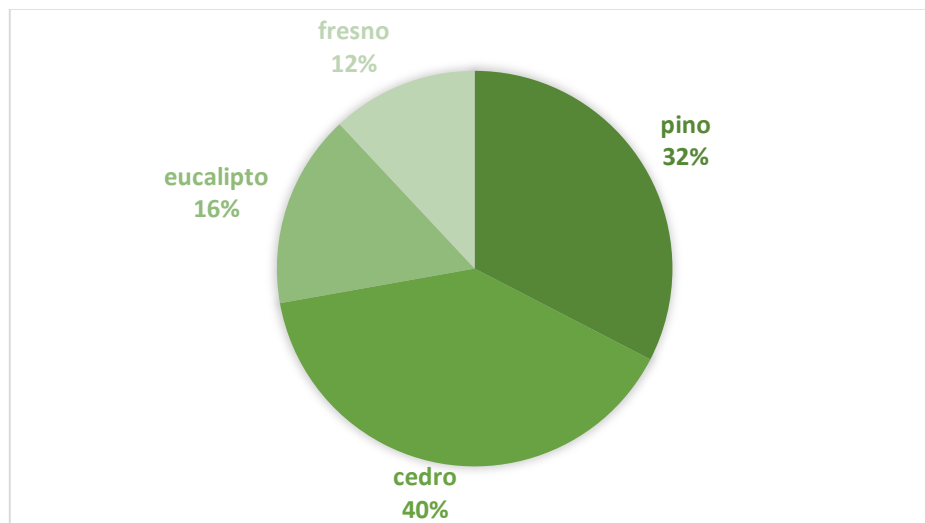


Figura 40 Distribución de las reservas de carbono en biomasa arbórea por especie

El análisis de regresión es la técnica estadística de uso más frecuente para investigar y modelar la relación entre variables. Su atractivo y utilidad generalmente son el resultado del proceso conceptualmente lógico de usar una ecuación para expresar la relación entre una variable de interés (la respuesta) y un conjunto de variables predictoras relacionadas (Pineda 2013). Con los datos obtenidos en la investigación se generaron dos modelos estadísticos tendenciales con el propósito de proyectar el comportamiento de la biomasa arbórea como reservorio de carbono y comparar los resultados entre sí

#### Modelo lineal

El modelo lineal se explica como la relación que existe entre dos variables, en este caso son la captura de carbono (Mg/ha) y el tiempo de plantación, para observar el comportamiento de la tasa de incorporación de carbono en la biomasa arbórea con objeto de extrapolar los valores a determinado tiempo; para el caso de este trabajo la ecuación obtenida muestra un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) con valor de 0.7118 lo que indica una eficiencia aceptable del modelo para predecir la tasa de incorporación del C la cual fue de 1.14 Mg/ha/año dentro del lapso comprendido para este estudio (1985-2012), a excepción del último año en donde se aprecia el aumento en el almacenamiento. Cabe mencionar que al igual que en los modelos siguientes, las proyecciones estimadas solo serán válidas en la medida en que los individuos alcancen su madurez fisiológica debido a que está demostrado que es finita la capacidad de incrementar biomasa y carbono en las especies arbóreas.

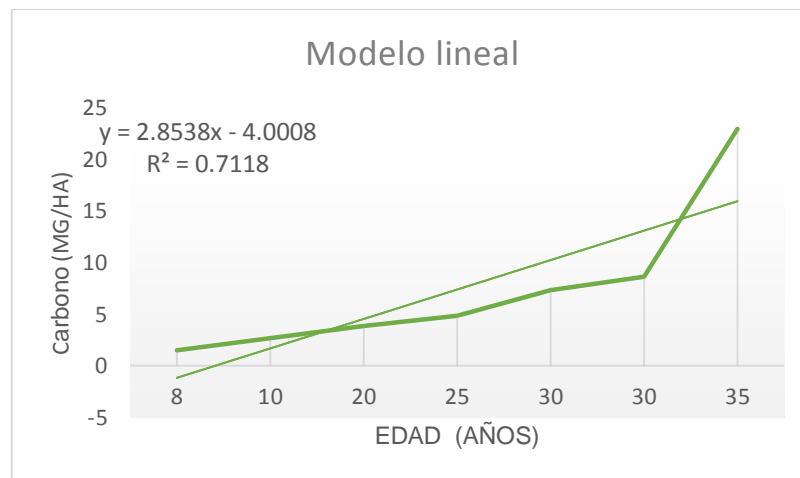


Figura 41 Grafica modelo lineal para detrmnar la tasa anual de incorporacion de carbono en las plantaciones forestales

#### Modelo potencial

Por otra parte, se presenta el modelo potencial, en el cual se muestra una línea de tendencia más ajustada, en donde el valor de  $R^2$  es de 0.8792 lo que se refiere a un valor aún más próximo de ajuste a los datos obtenidos en campo,

El modelo potencial permite obtener la mejor recta de ajuste a los datos, sin embargo, la correlación entre la variable dependiente e independiente, aunque es aceptable, comparada con otros estudios , sólo es aceptable dentro del rango de DAP para el que fue diseñado dicho modelo, en un estudio realizado en Chiapas en tres rodales de *Pinus oocarpa* localizados en el municipio de Cintalapa, Motozintla y Las Margaritas se realizaron distintos modelos estadísticos para obtener la relación entre captura de carbono y producción de biomasa, se obtuvieron estimadores estadísticos que permiten afirmar que las ecuaciones determinadas para estimar los valores de biomasa de *Pinus oocarpa* son adecuadas y confiables

para usarse en condiciones similares y para la misma especie (Gutierrez & Flores 2008), los resultados obtenidos fueron distintos para cada modelo, para el caso de su investigación el más aceptable se estableció con base en el valor máximo del coeficiente de determinación con el valor de  $R(R^2)$  el cual fue de .998, el valor mínimo de los predichos residuales de la sumatoria de cuadrados (PRESS) 0.59, y los residuales estudentizados.

Por otra parte, en una investigación realizada por Pineda (2013) sobre “Análisis de Regresión para la Estimación del Secuestro de Carbono Orgánico en Suelos” señala que la bondad de ajuste de los resultados va en relación con los valores de  $R^2$ , cercanos a 1 implican que la mayor parte de la variabilidad de Y esta explicada por el modelo de regresión, aunque siempre es necesario contemplar el tipo de datos con el que se trabaja para obtener aseveraciones más precisas. En el caso de la estimación del carbono de este trabajo, la correlación que se busca obtener en los resultados se basa en la cantidad almacenada a medida del tiempo por lo que es una relación lineal bastante estrecha y especifica no obstante, es preciso comentar que al igual que en el caso anterior, la ausencia de muestreo de rodales de edades mayores impide determinar la eficiencia del modelo en periodos de tiempo mayores.

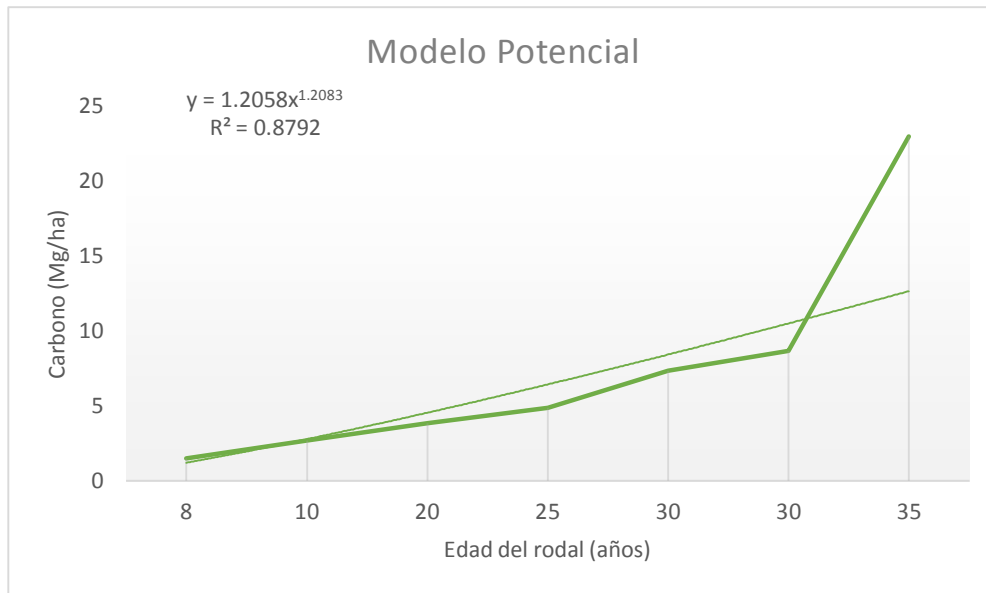


figura 42 Grafica modelo potencial para determinar la tasa anual de incorporación de carbono en las plantaciones forestales

Los modelos resultan eficientes para predecir la incorporación de C en individuos que están dentro del rango de edad de los rodales muestreados, sin embargo para ampliar el alcance del modelo predictivo es necesario trabajar en reforestaciones más antiguas las cuales en la sección muestreada no se encuentran presentes, como propuesta por lo anterior mencionado se propone que en una segunda etapa se ampliara el estudio y fortalecer así el modelo predictivo incluyendo zonas más altas o profundas todo ello contando con apoyo del personal que labora en el parque.



## **Capítulo IV Discusión**

### Estructura y diversidad de las plantaciones forestales

Al analizar la estructura de los sitios muestreados, aprecia que las reforestaciones más antiguas han tenido una baja tasa de sobrevivencia, gracias a los datos obtenidos en los diferentes recorridos en campo y entrevistas orales que se hicieron al personal que labora en el PESM la mayoría se deben tanto a fenómenos naturales como rayos y plagas como se registró y otros más a presencia de daños ocasionados por la actividades antrópicas como incendios provocados, actividades económicas como se explica a continuación.

Debido a que desde su decreto, el 22 de julio de 1976, es una de las áreas naturales más visitadas de Toluca con un total de 87,000 visitantes al año como se mencionó anteriormente, por su fácil acceso y cercanía con la zona urbana, aunque la mayor parte de las afectaciones se debe a las múltiples presiones económicas al tener una fuerte problemática en lo referido a la tenencia en donde la zona que presento un mayor cambio de uso de suelo fue La Teresona con un 46% de aumento en pavimentación y donde se utilizaban terrenos de cultivo para el año 2000 se habían vuelto construcciones de casas habitación, por otra parte la actividad ganadera ha afectado a las plantaciones de reforestaciones jóvenes de manera puntual al ser de tipo extensivo a base de bovinos, ovinos y caprinos contribuyen a la compactación de los suelos, procesos erosivos e impiden el crecimiento de los individuos puesto que los utilizan como alimento, esto último se pudo observar en campo con destrucción de las zonas de plantación más jóvenes, en dichos sitios no se realizaron tomas de muestras puesto que era individuos muy jóvenes pero la problemática mencionada era muy marcada; Todas estas inconsistencias han afectado su capacidad natural para proveer de bienes y servicios a los habitantes de la ciudad de Toluca

Con los datos obtenidos en comparación con los proporcionados mediante las entrevistas orales y recorridos de campo muestran una inclinación a una eficiencia baja en las reforestaciones, en donde la mayor parte de las acciones se llevan a

cabo en las partes bajas y laderas cercanas así como las zonas de acceso principales, no refiriéndose con ello a que en las demás zonas no se lleven a cabo las acciones de mantenimiento o campañas de reforestación, se debe al problema presente por tenencia de la tierra en donde existen muchos conflictos con los habitantes de las zonas aledañas tanto por incendios provocados, ganadería y creación de senderos y veredas que propician una mayor degradación de suelos y afectaciones intencionales en reforestaciones mediante la tala furtiva y principalmente por incendios ocasionados, de acuerdo con Sierra (2008) el PESH en el año 1998 se registraron 14 incendios dentro del parque que debilitaron o aniquilaron las reforestaciones. A consecuencia de ello, se aumentaron las poblaciones del insecto descortezador (*Dendroctonus adjuntos*), convirtiéndose en plaga y causando el exterminio de la mayoría de los árboles especialmente de *Pinus radiata*.

Empero a ello en estos sitios hubo un gran aporte por parte de los individuos que ya estaban, los sitios restaurados con actividades mecánicas presentaron una situación que favoreció la estabilidad del suelo y por ende la disminución de arrastre de sedimentos; además de las ventajas que presenta la plantación de especies en la retención de suelo

Tanto en diámetro como densidad arbórea se observa que la mayoría de los individuos son jóvenes, incluso en el sitio 1 (1985), aunque para éstos se puede observar también que hay mayor variabilidad de rangos, siendo *Cupressus lindleyi* la especie predominante. Esto pudiera deberse a la reposición de los individuos muertos o siniestrados por individuos juveniles, explicando así la diferencia de tallas y diámetros encontrados en varios de los sitios estudiados. Resulta evidente el

patrón de cambio en las prácticas de reforestación en las cuales a partir del año 2000 se sustituyeron eucaliptos y casuarinas por cedros blancos e incluso actualmente de acuerdo con los registros, se está optando por introducir árboles frutales principalmente en las áreas bajas de recreación y son arboles muy jóvenes aún.

#### La captura de carbono en las plantaciones forestales del PESM

Los estudios sobre la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de la biomasa urbana pueden ser muy variables ya que dependen de diversos factores como clima, escala, gestión de los parques y/o áreas verdes y los diferentes tipos de uso de suelo.

Se realizó una comparación con algunos trabajos sobre captura de carbono en parques urbanos para observar el grado de funcionalidad que tiene el PESM respecto a otros.

En el primero, llevado a cabo en un bosque urbano de la Ciudad de México (Santoyo et al. 2014), el estudio reportó que las áreas verdes arboladas almacenan 64 Mg C/ha y por medio de una extrapolación en sus datos se estimó un total de 79,180.9 Mg/C en sus 1,243.93 ha en las cuales se obtuvo un valor promedio de 64 Mg C/ha. Por otra parte, se identificó que los árboles con un diámetro entre los 26.7 y 48.3 cm almacenan la mayor proporción de C con 85.6 Mg

Al comparar los datos con el obtenido en el PESM, el cual fue de 51.9 Mg C/ha, no muestra una diferencia muy marcada a pesar de que los valores en los rangos de los individuos si fueron más notorios puesto que en la mayoría de los árboles del PESM presentan edades más jóvenes con diámetros de 1.5 cm para el más joven hasta 57 cm para el más grande.

Por otra parte, en un estudio realizado en el Parque Metropolitano Bicentenario, Toluca, México (Mañon et al, 2018) reportó que éste almacena 517.958 Mg C, con un promedio de 64.42 Mg C /ha, en este caso la diferencia de cantidad de C almacenado es muy superior a la de PESM a pesar de la diferencia en extensión entre ambas áreas verdes siendo 19.69 hectáreas en el PMB y de 1,255 has el PESM, gracias a los datos del este caso de estudio se pueden contrastar las especies que mayor capacidad de captura y almacenamiento de carbono mostraron, en el PMB fueron *Cupressus lusitánica* (cedro blanco) y *Pinus cembroides* (pino piñonero), *Eucaliptus camaldulensis* (eucalipto rojo) y *Eucaliptus globulus* (eucalipto azul), este resultado es similar en el PESM en donde las especie *Cupressus* además de encontrarse en mayor cantidad también fue la que más C almacenado reporto con un total de 40% seguido del género *Pinus* con un 32%.

Un estudio similar elaborado por Galeana y Velazco (2019) en Bienes Comunales Santiago Tlacotepec evaluó predios reforestados de bosques así como un fragmento de bosque conservado que sirvió como referencia, esto bajo un esquema de crono secuencia para comparar la capacidad de captura de carbono de cada una de las zonas de estudio, las especies registradas fueron *Pinus hartweggii*, en el año que mayor cantidad de carbono reportado hubo fue en 1983 con 80.7 Mg/ha lo que representa un 35.59% este fue el sitio que se tomó de referencia como línea base del área en mejor estado de conservación, para el caso de PESM en el año de 1985 se registró un total de 22.97 Mg/ha que representa el 44.27% del total obtenido, se considera bajo en comparación con lo obtenido para el caso de Santiago Tlacotepec, sin embargo se debe considerar que ese fue un sitio seleccionado con las mejores condiciones del área, por otra parte el sitio más joven del caso ya mencionado apenas reporto 0.6 Mg/ha en el año 2013, muy debajo por

lo que se esperaba, se menciona que el sitio lo califican como como frágil por lo que se recomiendan prácticas de manejo para preservar el área, mientras que en el PESM se reporta 1.5 Mg/ha para el año 2012 y representa el 2.88% del total lo que se considera bueno en comparación con la edad del sitio y en referencia del trabajo anterior.

Para realizar aproximaciones a diferentes periodos determinados y estimar el comportamiento en cada uno de los sitios, se elaboraron modelos tendenciales con el fin de apoyar la toma de decisiones sobre las estrategias de reforestación seguidas para esta ANP.

Mediante el modelo lineal se obtuvo que el valor estimado de almacenamiento en 50 años fue 110.03 Mg C/ha, el exponencial  $2.41 \times 10^{18}$  Mg C/ha con valores muy por encima de los esperado en comportamientos de crecimiento natural y el logarítmico 184.41 Mg/ha., el valor es relativamente bajo al ser un área de preservación de flora y fauna. Se considera que el factor de crecimiento y sobrevivencia fueron perjudicadas por agentes externos como heladas presentadas en los últimos 4 años atrás y los incendios que físicamente se encuentran evidentes en el fuste de los individuos muestreados.

Para el caso del PESM se puede observar que este cuenta con un nivel inferior a los estudios citados, ya que sus reservas de C en biomasa se sitúan en apenas 51.9 Mg C/ha en los 7 sitios muestreados.

También es importante mencionar la densidad, la cual nos indica cuantos son los árboles que puede haber por hectárea, de acuerdo con CONAFOR lo recomendable

es de 1100 a 1600 especies durante la reforestación para finalizar con 600 individuos en la etapa de madurez (PROBOSQUE 2018).

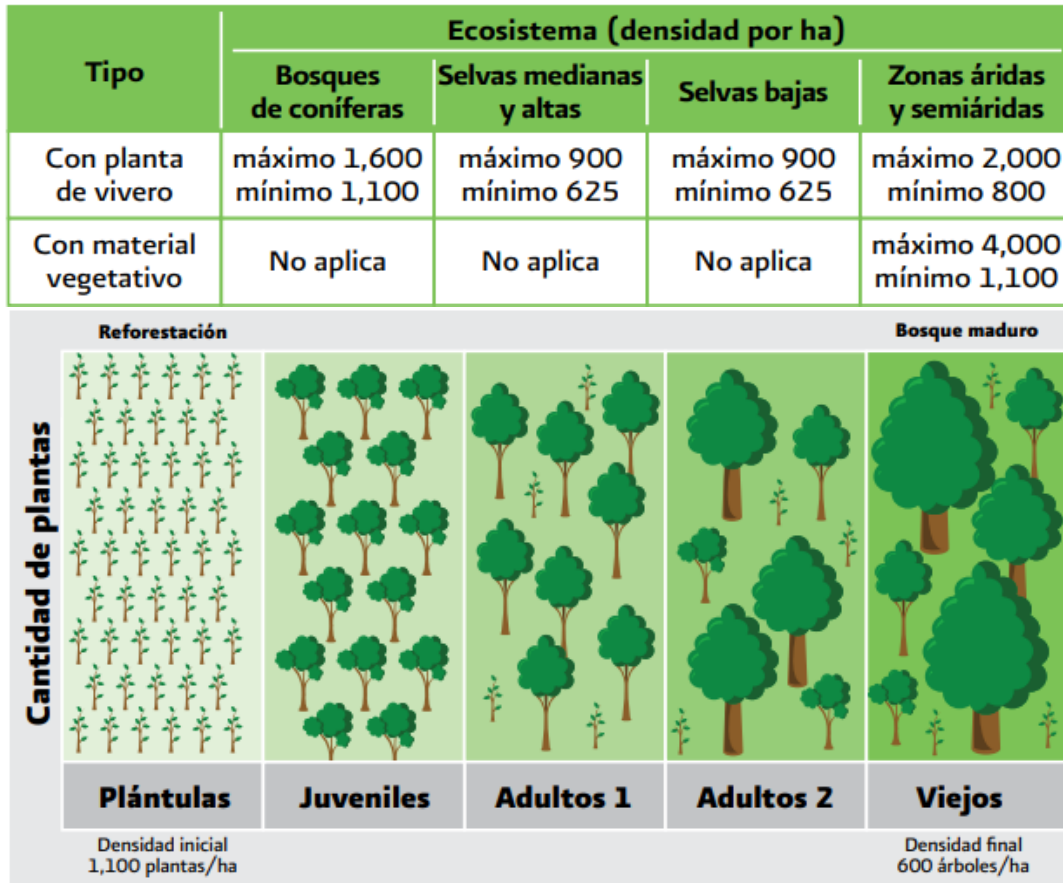


Figura 43 Densidad por hectárea fuente: CONAFOR

En el PESM la densidad arbórea se presenta de diferentes formas en los rodales en donde algunos como los años 1990,1995 y 2000 es alta ya que el número de individuos rebasa los establecidos; por otra parte para el año de 1985 la densidad se presenta muy baja siendo el sitio más antiguo, la correlación densidad con almacenamiento de CO<sub>2</sub> no es óptima ya que como se menciona el año de 1995 fue el que presentó la más alta densidad con 1330 individuos por hectárea pero el resultado de almacenamiento no supera los 5 Mg/ha, esto podría deberse a que los individuos son relativamente jóvenes con diámetros más abundantes de .69- 20 cm en todos los sitios mientras que en el PMB la mayor abundancia se encontró entre de 30-50 cm lo que se traduce en árboles más maduros.

#### Propuesta de un modelo de captura de carbono para el PESM

Los resultados pronosticados para los próximos 30 años se muestran en la tabla 17 en diferentes patrones de crecimiento de acuerdo al modelo estadístico aplicado en donde se observa que manteniendo las acciones de reforestación y mantenimiento que se han llevado hasta el momento como lo indica un modelo lineal, la captura de carbono aumentará con un estimado de 181 Mg /ha, y en el caso del modelo potencial de 173.24 Mg/ha. Los datos anteriores son compatibles con estudios realizados para bosques mixtos (Acosta et al., 2002; Gómez Castro et al., 2010; Rodríguez Larramendi et al., 2016). En dichos estudios se aplicó el modelo exponencial demostrando que es posible predecir la acumulación de C en árboles de edades inferiores a 70 años. Es preciso mencionar que la capacidad y predictibilidad de estos modelos será más eficiente en la medida en que se incremente el tamaño muestral de los estudios. De esta forma, la Tabla 17 muestra

el estimado de acumulación de C en los rodales en función de la edad de los árboles de acuerdo a los modelos empleados.

Tabla 17 Estimación de potencial de captura de carbono en biomasa arbórea mediante modelo de regresión.

Edad de la plantación (años)	Potencial de captura (Mg /ha)	
	Modelo lineal	Modelo Potencial
40	110.15	106.61
45	124.42	119.94
50	138.68	133.26
55	152.95	146.58
60	167.22	159.91
65	181.49	173.24

Como se puede observar en ambos modelos se obtienen resultados bastantes similares, por un lado el modelo lineal muestra un mayor aumento en el carbono almacenado en los proximos 30 años, es decir cuando los rodales actualmente muestreados cumplan una edad de 65 años el carbono almacenado hasta ese punto bajos las mismas condiciones que presenta el parque hoy sera de 181.49 Mg/ha. Por otra parte el modelos potencial muestra valores ligeramente menores al lineal y si bien el modelo potencial tiene  $r^2$  aceptable, no es del todo útil aplicarlo para a todo el ecosistema forestal ya que los arboles crecen de una forma más lineal y continua en cuanto a grosor de fuste (Aguilar et. al.2016).



En el PESM existe una muy marcada inclinación en abundancia de individuos jóvenes aun en los sitios más antiguos registrados para este trabajo, en donde lo más conveniente sería encontrar sitios con árboles con mayores diámetros que proporcionen una estratificación a largo plazo de sucesión, ya que se ha demostrado que los árboles de mediana edad son los mayores almacenadores de diámetro con diámetros que varían de 40 a 60 cm (Galeana & Velasco 2019)(MITECO 2019), esto no fue posible debido a las recomendaciones del personal que labora en el parque ya que como señalan existe un alto índice delictivo en las partes altas del parque, al adentrarse más a la zona boscosa, como se ha venido mencionando a lo largo del trabajo, esa también ha sido una causa del bajo nivel de participación en las supervisiones posteriores a campañas de reforestación en predios más arriba de los supervisados por el mismo personal, además de lo ya mencionado existen limitantes que hagan posible un muestreo más amplio en las laderas contrarias a la zona de actividades recreativas del parque dado que el área es utilizada para distintas actividades económicas (ganadería, agricultura y recreación, etc.) en donde el 18% pertenece a terrenos comunales, 16% ejidales y tan solo el 24% al sector público (Sierra 2008).

## Conclusiones

Lo expuesto anteriormente permite concluir la situación actual del PESM con respecto al funcionamiento como sumidero de carbono, en el cual se llevan a cabo diversas campañas de reforestación con la finalidad de aumentar su potencial y con ello obtener los beneficios ambientales que debe proporcionar.

En general se detectan que anteriormente las especies utilizadas no eran las adecuadas para la reforestación de la zona debido a las implicaciones que las especies introducidas traen consigo como lo son modificación de vegetación secundaria, pérdida de biodiversidad, degradación de suelos. Esta condición se puede ilustrar con el caso de los rodales de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) visto en el sitio 5 con edades mayores , ya que es una especie que consume importantes cantidades de agua, debido a su alta tasa de evapotranspiración y rápido crecimiento, además de que debido al sistema radicular superficial con el que cuenta no contribuye en el proceso de edafogénesis del área aumentando los procesos de erosión y a la vez realiza una captura selectiva de nutrientes desde el suelo impidiendo el crecimiento vegetación secundaria

Actualmente se cuenta con una estrategia de forestación en el PESM, se establece dentro del informe técnico de De la Rosa (2018), iniciando con el establecimiento de la adopción de los predios, posteriormente el uso de técnicas de preparación de chinampas y cunetas en los terrenos, seguido de la elaboración de composta para agregarla al momento de la siembra y por último la forestación así como el seguimiento del mismo, además se optó por el cambio en las especies utilizadas anteriormente por especies del género *pinus* y *cupressus*, aunque aun así el terreno de planicie (donde se adoptan los predios actuales para forestación) sigue sin ser apto para el crecimiento de los mismos ya que es un terreno inundable, y la vegetación originaria eran pastos y vegetación hidrófila.

Por otra parte, en las laderas existen manchas de masa arbórea en donde la densidad es muy abundante lo que genera un crecimiento y desarrollo más

deficiente de los individuos debido a la competencia por nutrientes, luz, entre otro. Esta situación afecta directamente a la eficiencia en cuanto al almacenamiento del CO<sub>2</sub> ya que propicia una reducción de la supervivencia de los individuos más jóvenes así como en el crecimiento dando como resultado arboles con fustes muy delgados y doseles estrechos como se observa para el año 1995 (sitio 4), en este sentido es importante realizar técnicas de aclareo para estimular el crecimiento en diámetro de los árboles a través del control de la densidad tanto como se requiera en cada rodal, a propósito de esto es importante recalcar que existen variables para que un individuo arbóreo acumule el mayor contenido posible de carbono una de ellas es cuando el árbol se encuentra enfermo o plagado el crecimiento se manifiesta lento o en ocasiones nulo, por lo tanto, su producción de biomasa será deficiente y en consecuencia, almacenará poco carbono.

Caso contrario a este también se observaron rodales en donde se aprecia un repoblamiento natural con vegetación secundaria y cuenta con niveles más estratificados, con mayor abundancia de especies como se observó para los años de 1985 (sitio 1), 1990 (sitio 2) y 2010 (sitio 6)

En cuanto a la estimación del carbono se observó un déficit en comparación con los otros citados contando con niveles inferiores en áreas verdes similares, además de que por las dimensiones del parque se esperaría contar una mayor tasa de incorporación del C, a su vez cómo se observó en los modelos estadísticos generados la evolución para el periodo de los 30 años posteriores al estudio apenas estaría alcanzando el requerido hoy día, esto claro si se continuaran con las acciones de reforestación, forestación y mantenimiento actuales.

Otro aspecto que se considera necesario mencionar es de carácter socioeconómico como problemática en cuanto a tenencia y uso de suelo dentro del polígono del parque, ya que influye en los resultados y el desarrollo de PESM a largo plazo, y es que gran parte de este pertenece a un sector privado, ejidal y comunal en donde no se logra establecer un acuerdo en con los propietarios de los terrenos aledaños impidiendo realizar actividades de saneamiento en esas áreas, esto ha traído como consecuencia que los habitantes al rededor del parque cada vez estén adentrándose más y se esté disminuyendo el área del parque, además de que las prácticas de actividades como ganadería genera alteraciones directamente a las reforestaciones en cuanto a la perdida de individuos recién plantados o indirectamente como la compactación de suelo, perdida de fauna nativa e introducción de fauna feral y el aumento de incendios provocados con la finalidad de obtener mayor extensión de terrenos para cultivo o construcción de casas habitación.

## Índice tablas

Tabla 1 Capacidad de captura de CO <sub>2</sub> de diferentes superficies de parques en Tijuana.....	23
Tabla 2. Estimación de captura de CO <sub>2</sub> del arbolado en parques de otras ciudades. ....	24
Tabla 3 Biomasa y contenido de C para los estudios referenciados .....	26
Tabla 4 Tenencia de la superficie del PESM.....	31
Tabla 5 Listado de especies arbóreas introducidas al Parque Estatal Sierra Morelos durante las campañas de reforestación.....	33
Tabla 6 Registros de plantaciones .....	35
Tabla 7 Unidades geomorfológicas y características del relieve del Parque Estatal Sierra Morelos .....	42
Tabla 8 Grupos de suelos WRB y principales características .....	46
Tabla 9 Usos locales de la vegetación existente en el Parque Estatal Sierra Morelos .....	53
Tabla 10 Fauna reportada dentro de la zona .....	55
Tabla 11. Ubicación y año de plantación de los sitios de estudio.....	60
Tabla 12. Formato de registro de Información.....	63
Tabla 13 Criterios de daño en individuos arbóreos .....	63
Tabla 14 Ecuaciones alométricas de especies que conforman el estrato arbóreo en el PESM .....	65
<i>Tabla 15 Caracterización de rodales por año de reforestación .....</i>	<i>75</i>
Tabla 16 Reservas de carbono por año de plantación. ....	80
Tabla 17 Estimación de potencial de captura de carbono en biomasa arbórea mediante modelo de regresión. ....	96

## Índice de figuras

Figura 1 el ciclo global del carbono.....	11
Figura 2 Diagrama simplificado de los almacenes y flujos de carbono en un ecosistema forestal Fuente: Ordoñez, 1999.....	13
Figura 3 Ejemplos de Servicios ambientales.....	19
Figura 4 Mapa topográfico del Parque Estatal Sierra Morelos, elaboracion propia con fuente en INEGI.....	38
Figura 5 Individuo de la especie Prunus serótina (capulín).....	50
Figura 6 Imagen Rodal con vegetación inducida (Pinus radiata y Cupressus lindleyi ).....	51
Figura 7 Imagen Fuente: Naturalista 2021 .....	55
Figura 8 imagen Fuente: Naturalista 2018 .....	55
Figura 9 Imagen fuente: Propia.....	55
Figura 10 Imagen fuente: Naturalista 2018 .....	55
Figura 11 Imagen fuente: Naturalista 2018 .....	56
Figura 12 Imagen fuente: Naturalista 2021 .....	56
Figura 13 Imagen fuente: propia .....	56
Figura 14 Diagrama de la metodología empleada para la investigación .....	59
Figura 15 Mapa uso de suelo y ubicación de sitios por fecha de plantación, .....	61
Figura 16. Colocación de las cuerdas para transecto .....	62
Figura 17 Procedimiento para la aplicación de los modelos alométricos en especies arbóreas .....	66
Figura 18. Panorámica del sitio 1 .....	67

Figura 19 Distribución porcentual de especies para el sitio 1.....	67
Figura 20. Panorámica del sitio 2. ....	68
Figura 21. Distribución porcentual de especies arbóreas para el sitio 2.....	68
Figura 22 Panorámica del sitio 3. ....	69
Figura 23 Distribución porcentual de especies para el sitio 3.....	69
Figura 24 Panorámica del sitio 4.....	70
Figura 25. Panorámica del sitio 5. ....	71
Figura 26 Distribución porcentual de especies para el sitio 5.....	71
Figura 27. Panorámica del sitio 6.....	72
Figura 28 Distribución porcentual de.....	72
Figura 29 Panorámica del sitio 7.....	73
Figura 30 Distribución de individuos por DAP para el sitio 7.....	73
Figura 31 Densidad arbórea para los diferentes sitios de estudio.....	74
Figura 32 Diámetros promedio para cada sitio de estudio. ....	77
Figura 33 Grafica media de diámetro por especie y año.....	78
Figura 34 DAP promedio para individuos del género Pinus. ....	79
Figura 35 DAP promedio para individuos del género Cupressus.....	79
Figura 36 Grafica reservas de carbono en biomasa arbórea.....	81
Figura 37 Estimacion de las reservas de carbono para Cupressus lindleyi periodo 1985-2012.....	82
Figura 38 Estimacion de las reservas de carbono para Pinus en el periodo 1985-2012.....	83
Figura 39 Grafica comparacion de captura de CO <sub>2</sub> por especie.....	83
Figura 40 Distribucion de las reservas de carbono en biomasa arborea por especie.....	84

Figura 41 Grafica modelo lineal para detrmnar la tasa anual de incorporacion de carbono en las plantaciones forestales .....	86
figura 42 Grafica modelo potencial para detrmnar la tasa anual de incorporacion de carbono en las plantaciones forestales .....	88
Figura 43 Densidad por hectárea fuente: CONAFOR .....	94



## Referencias

Acosta, M., J. Vargas H., A. Velázquez M. y J. Etchevers. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6):725-736.

Aguilar G., Pérez G., Suárez M., López M., Moya E. & Wayson C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*. 22. 23. 10.21829/myb.2016.2231454.

Apps M.J., W.A. Kurz, R.J. Luxmoore, L.O. Nilsson, R.A. Sedjo, R. Schmidt, L.G. Simpson y T.S. Vinson. (1993). Boreal Forests and Tundra. In: Wisniewski, J. y R.N. Sampson (Eds). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO<sub>2</sub>*. Kluwer Academic Publishers. Holanda : 39-53.

Arbestain M. (2004). Los sumideros de carbono en el marco del protocolo de Kioto. *Edafología*, 11(1): 27-36.

Ayala R., De Jong B., Ramírez H., (2001). Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. *Rev Chapingo Ser Cienc For Am* 7:153–157

Bonilla E. (2009). Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis, Universidad Autónoma Chapingo

Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler y P. Woomeer. (1993). Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*. No. 70: 71-94.

Camacho V. & L. Ruiz. (2012). Marco conceptual y clasificación de los de los servicios ecosistémicos. *Biociencias*. 1(4): 3-15.

Cano Z. (1994). Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acrididae) y productividad primaria neta aérea en una comunidad xerófila. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.

Carson R. (1962). *Silent spring*. Boston, MA. Houghton Mifflin Company, 350.

Cely B. (1999) Metodología de los Escenarios para Estudios Prospectivos. *Revista Ingeniería e Investigación* 44:26-35

CEPANAF. (2020). Parques recreativos. Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna. Recuperado de [http://cepanaf.edomex.gob.mx/parques\\_turisticos](http://cepanaf.edomex.gob.mx/parques_turisticos)

Código para la biodiversidad del estado de México. Gaceta del Gobierno del Estado de México, el miércoles 3 de mayo de 2006. Recuperado de: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/mex137613.pdf>

Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/4/321Ley%20de%20Desarrollo%20Forestal%20Sustentable%20del%20Estado%20de%20M%C3%A9xico>

Daily GC (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 392.

De la Vega C. F. & H. Ramírez. (2010). *Dendrometría*. Universidad Autónoma de Chapingo. Recuperado de <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>

Delgado L., A. Acevedo, F. Castellanos, H. Ramírez & J. Serrano. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*. 30(5): 275-283 Recuperado de: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442005000500007](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000500007)

De la Rosa, I. (2018). "Programa de forestación del Parque Sierra Morelos, en el ciclo 2017-2018". Toluca: Instituto Tecnológico de Toluca.

Díaz R. (2005). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en el estrato aéreo en bosques de *Pinus patula* Schl. Cham., en Tlaxcala México. Tesis, Universidad Nacional Autónoma Chapingo.

Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.

Sierra, G. D. (2008). Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Sierra Morelos. Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Estado de México.

ECURED. (2018). Secuestro de carbono. Recuperado de: [https://www.ecured.cu/Secuestro\\_de\\_carbono](https://www.ecured.cu/Secuestro_de_carbono)

Environmental Protection Agency (2004). Ecological benefits assessment strategic plan. Washington. DC: SAB Review Draft

FAO. (2001). Situación de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, Italia Recuperado de: <http://www.fao.org/3/Y0900S/y0900s00.htm#TopOfPage>

FAO/OAPN. (2009). Pago por Servicios ambientales en Áreas Protegidas de América latina. Organismo Autónomo Parques Nacionales del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017739.pdf>

Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. (1985) Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. *Nature*; 315: 207–210.

Fisher B., Turner K.R., Morling P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*; 68: 643-653.

Galeana J. L., Velasco C.A.(2019) Estimación de la capacidad de captura de carbono en la biomasa aérea, dentro de una cronosecuencia de bosques reforestados en el Nevado de Toluca, caso de estudio: Bienes Comunes Santiago Tlacotepec. Universidad Autónoma del Estado de México.84

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM.

García F., B. H. de Jong, P. Martínez & F. Paz-Pellat. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*. 72:835–864

González D. & J. Figueroa. (2013). Valoración del servicio eco sistémico secuestro de carbono como una vía para contribuir con el desarrollo sostenible de un país. caso Venezuela. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. 11: 1-5.

Gómez Castro. H., R. Pinto R., F. Guevara y A. González. (2010). Estimación de biomasa aérea u carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam.) y *Leucaena leucocephala* y su aplicación en sistemas silvopastoriles. ITEA 106 (4): 256-270.

Gutiérrez, N.S. (2007). Diagnóstico actual de los recursos naturales del Parque Estatal "Sierra Morelos", Estado de México. Producción animal en zonas áridas y semiáridas 0187-3296. 1. 582-586.

Gutiérrez V.B. & Flores M. A. (2018) CAPTURA DE CARBONO Y MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMAR BIOMASA EN RODALES NATURALES DE *Pinus oocarpa* Schl. et Cham. EN CHIAPAS, MÉXICO. *Foresta Veracruzana*, 2(20): 21-28

Hernández R., J.C. Cedillo Pérez, J.G. Plata & R. Czerny. (2018). Distribución de áreas verdes y bienestar socio ambiental. Un estudio en la Ciudad de Toluca, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 9(21): 919-942.

INAFED (2010) Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. SEGOB Secretaría de Gobernación, enciclopedia de los municipios y delegaciones de México

IPCC. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas. Recuperado de: [https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_spm\\_ts\\_sp.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf)

Irineo, R. E. (2013). Evaluación de la calidad del suelo para diferentes usos y cubiertas vegetales en la ladera este de Cerro Grande, comunidad Dexcaní Alto, municipio de Jilotepec. Universidad Autónoma del Estado de México.

Jaramillo, V. J. (2004). Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México. Recuperado de: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/53409504/Victor-Jaramillo-Cambio-Climatico-Una-Vision-desde-Mexico-.pdf?response-contentdisposition=inline%3B%20filename%3DVictor\\_Jaramillo\\_Cambio\\_Climatico\\_Una\\_Vi.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/53409504/Victor-Jaramillo-Cambio-Climatico-Una-Vision-desde-Mexico-.pdf?response-contentdisposition=inline%3B%20filename%3DVictor_Jaramillo_Cambio_Climatico_Una_Vi.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz).

Jaramillo, V. J. (2007). El ciclo global del carbono. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/jaramillo.html>

Khan Academy, (2018). El ciclo del carbono. Recuperado de: <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-carbon-cycle>

Lorca, A. M. (1989). El parque urbano como espacio multifuncional: origen, evolución y principales funciones. *Paralelo 37°*. 13: 105-111

Maass, S. F. (2009). Estimación de la captura de carbono en zonas forestales: El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México.

Macip, R. (2013). Pago por servicios ambientales (ecosistémicos) en México ¿una alternativa para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo? *Biocyt*. 6: 375-387.

Madrid, A. Y. (2016). Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO<sub>2</sub> vehicular en Tijuana, B.C. Recuperado de <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Dom%C3%ADnguez-Madrid-Ana-Yurendy.pdf>

Mañón R., Orozco M.E. & Mireles P. (2018). Evaluación de los servicios ambientales del Parque Metropolitano Bicentenario, Toluca, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 5.

Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/326175193\\_Evaluacion\\_de\\_los\\_servicios\\_ambientales\\_del\\_Parque\\_Metropolitano\\_Bicentenario\\_Toluca\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/326175193_Evaluacion_de_los_servicios_ambientales_del_Parque_Metropolitano_Bicentenario_Toluca_Mexico)

Martínez L. (2008). *Los árboles de la ciudad de México*. México D.F. Universidad Autónoma Metropolitana.

Meza M.C. y Moncada J. O.(2010) Las áreas verdes de la ciudad de México: Un reto actual. *Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. Universidad de Barcelona. 16(56). Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-331/sn-331-56.htm>

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC. World Resources Institute.

Ministerio para la Transición Ecológica MITECO (2019). Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono, 4(29)

Recuperado de [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guiapa\\_tcm30-479094.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guiapa_tcm30-479094.pdf)

Morales C. C.; Madrigal D.; González L. A. (2007) Isla de calor en Toluca, México *Ciencia Ergo Sum* Universidad Autónoma del Estado de México Toluca, México, 14(3), 307-316

Mooser, F. (1996). Geología del Valle de México y otras regiones del país. Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM. 98 Recuperado de: [www.investigacionesgeograficas.unam.mx](http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx)

Naturalista (2020) CONABIO <http://www.naturalista.mx/taxa/43155-Romerolagus-diazi>

Naturalista,(2021) CONABIO <http://www.naturalista.mx>

Naturalista,(2018) CONABIO <http://www.naturalista.mx>

Niklas K.J. & B.J. Enquist. (2002). On the vegetative biomass partitioning of seed plant leaves, stems, and roots. *Am. Naturalist* 159: 482-497. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/23174923\\_On\\_the\\_Vegetative\\_Biomass\\_Partitioning\\_of\\_Seed\\_Plant\\_Leaves\\_Stems\\_and\\_Roots](https://www.researchgate.net/publication/23174923_On_the_Vegetative_Biomass_Partitioning_of_Seed_Plant_Leaves_Stems_and_Roots)

ONU. (2018). Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Nueva York, EEUU. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.htm>

Ordóñez, J.A. (1999). Captura de Carbono en un Bosque Templado: El Caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología. México.

Ordoñez, J.A. & O. Masera. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*,:7 (1): 3-12



Orozco M. E., P. Mireles, M.E Valdez. (2013). Cubiertas forestales y escenarios de carbono en el estado de México, 2002-2010. *Revista Geográfica de América Central*, 2(51):169-188. Recuperado a partir de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/5994>

Pagiola, S. & G. Platais. (2002). Pago por servicios ambientales. *Environment Strategy*. 3. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/265357785\\_Pagos\\_por\\_Servicios\\_Ambientales](https://www.researchgate.net/publication/265357785_Pagos_por_Servicios_Ambientales)

Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono. Madrid. España. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

Pineda G.L. (2013). Análisis de Regresión para la Estimación del Secuestro de Carbono Orgánico en Suelos. BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS. Tesis: 64

Programa Mexicano del Carbono. (2015). Manual de procedimientos Inventario de Carbono+(RETUS con BASES EDOMEX).Texcoco, México.

PROBOSQUE. (2018). Programa para la compensación económica por el servicio ambiental de captura de carbono en el Estado de México. Secretaria de Medio Ambiente. Recuperado de <http://probosque.edomex.gob.mx/procarbono>

Ríos, J. E. (2015). Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur. Zapopan, Jalisco, México.

Rodríguez Larramendi, L.A., F. Guevara Hernández, L. Reyes Muro, et al. (2016). Estimación de biomasa y carbono en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 7(37): 77-94.

Romero, J. C., J. G. Cedillo, J.J. Pérez, R. Plata & M. Czerny. (2018). Distribución de áreas verdes y bienestar socio ambiental. Un estudio en la Ciudad de Toluca, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 9(21): 919-942.

Santoyo G. H., F. García & H. Benavides. (2014). Contenido de carbono en el bosque urbano de la Ciudad de México: Delegación Miguel Hidalgo. Programa Mexicano del Carbono, México.

Sánchez Galindo, S. (2005). *Propuesta educativa para el área natural protegida parque estatal Sierra Morelos, sendero interpretativo los pinos*. (Tesis de maestría). Centro universitario de ciencias biológicas y agropecuarias. Universidad de Guadalajara.

Saugier, B., & J.Y. Pontailier. (2006). El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*, 41(3):71-85. Recuperado de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282006001200006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006001200006&lng=es&tlng=es).

Saville A. & Bailey R.S. (1980). The assessment and management of the herring stocks in the North Sea and to the west of Scotland. *Rapports et Procès-Verbaux des Reunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*; 177: 112–142.

SEMARNAT (2011) ORDENAMIENTO ECOLÓGICO TERRITORIAL DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA: SIETE MUNICIPIOS (LERMA,

METEPEC, OCOYOACAC, SAN MATEO ATENCO, TOLUCA, XONACATLÁN Y ZINACANTEPEC). Gaceta de Gobierno del Estado de México. Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México. 327  
Recuperado de:

[Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Territorio de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, publicado en Gaceta de Gobierno del Estado de México el 6 de diciembre de 2011 \(conformado por los municipios de Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlan y Zinacantepec\).](#)

SEMARNAT (2016). Protocolo de Kioto sobre cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico?idiom=es>

Seppänen P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta Veracruzana*. 4(2):51-58.

Segura M., & H.J. Andrade. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*. 46: 89-96. Recuperado de: [http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/6935/Como\\_construir\\_modelos\\_alometricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/6935/Como_construir_modelos_alometricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Toribio M (2006) Almacenamiento de carbono en raíces de plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden y *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México. Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Vences C. (2014). Estudio del estado y evolución de la cubierta vegetal en áreas Naturales protegidas y áreas verdes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca del 2000 al 2008. Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México.

Vigil N. (2010). Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en el campo forestal experimental Las Cruces, Texcoco, México. Tesis, Universidad Autónoma Chapingo.

Westman W. (1977). How much are nature's services worth? *Science*; 197, 960–964.