



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**EL PAPEL DEL PARQUE ECOLÓGICO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO COMO SUMIDERO DE
CARBONO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

DIANA LAURA MANRÍQUEZ GUZMÁN



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ZENÓN CANO SANTANA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A la Universidad Nacional Autónoma de México,
mi segundo hogar.*

A mi familia.

Y a mis amigos.

*Todos ellos han hecho de mí
una mejor versión.*

En el universo han ocurrido fenómenos maravillosos, el primero fue la chispa de vida que surgió en innumerables formas; el segundo cuando apareció el árbol, un ser viviente que emerge hacia el cielo, seres que tienen la capacidad de tomar la energía del sol y carbono para alimentarse de ellos, tanto así, que regulan el clima de la Tierra del que tanto dependemos. Esta magia ocurre frente a nosotros todo el tiempo y depende de todos que siga ocurriendo.

D.L. Manríquez



Parque Ecológico de la Ciudad de México (2017). Foto: D.L. Manríquez.

ÍNDICE

RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. El carbono en el Antropoceno	8
1.2. El carbono y el efecto invernadero.....	9
1.3. El papel del carbono en los ecosistemas terrestres.....	10
1.4. Ecosistemas terrestres como sumideros de carbono.....	13
1.5. El Parque Ecológico de la Ciudad de México.....	16
1.6. Justificación	16
2. OBJETIVOS	19
3. MÉTODOS	20
3.1. Sitio de estudio	20
3.2. Carbono y biomasa en pie	20
3.2.1. <i>Matorral xerófilo conservado.....</i>	21
3.2.2. <i>Matorral xerófilo sucesional.....</i>	22
3.2.2.1. <i>Análisis dimensional de árboles y arbustos.....</i>	24
3.2.2.2. <i>Método de cosecha en estrato bajo.....</i>	26
3.2.3. <i>Bosque de encino.....</i>	27
4. RESULTADOS	28
4.1. Composición de especies	28
4.2. Ecuaciones obtenidas	28
4.3. Matorral xerófilo conservado.....	29
4.4. Matorral xerófilo sucesional	29
4.4.1. <i>El estrato arbóreo</i>	29
4.4.2. <i>El estrato arbustivo</i>	29
4.4.3. <i>El estrato bajo.....</i>	29
4.4.4. <i>Aportación de biomasa y carbono por estrato en el matorral xerófilo sucesional.....</i>	31
4.5. El bosque de encino	32
4.5.1. <i>Relación entre los rasgos del estrato arbóreo y la biomasa</i>	32
4.5.2. <i>Distribución de frecuencias de los rasgos de la vegetación arbórea</i>	33
4.6. Área cubierta por cada tipo de vegetación.....	35
4.7. Almacén aéreo de biomasa y carbono en el Parque Ecológico de la Ciudad de México.....	35
4.8. Almacén total (aérea y subterránea) de biomasa y carbono.....	36
5. DISCUSIÓN.....	37

5.1. La importancia del almacén de C en el PECM.....	37
5.2. El matorral xerófilo conservado	40
5.3. El matorral xerófilo sucesional.....	41
5.4. Rasgos de los estratos del matorral xerófilo sucesional.....	41
5.4.1. <i>Estrato bajo</i>	41
5.4.2. <i>Estrato arbustivo</i>	42
5.4.3. <i>Estrato arbóreo</i>	42
5.5. El bosque de encino	43
5.5.1. <i>Relación del estrato arbóreo y la biomasa</i>	43
5.5.2. <i>Biomasa aérea almacenada</i>	44
5.6. Factores que afectan el almacén de biomasa y secuestro de carbono en el PECM.....	46
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
LITERATURA CITADA	53
Apéndice 1	66
Apéndice 2	68
Apéndice 3	70
AGRADECIMIENTOS.....	71

Manríquez, D.L. 2018. El papel del Parque Ecológico de la Ciudad de México como sumidero de carbono. Tesis profesional. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. 71 pp.

RESUMEN

Desde hace dos siglos la especie humana ha provocado e intensificado las transformaciones severas en el planeta. Uno de los eventos más alarmantes es el calentamiento global, que ha ido en aumento acelerado a consecuencia del incremento de los gases de efecto invernadero, entre los que destaca el dióxido de carbono. Una forma de mitigar el calentamiento global es a través de la conservación de la cobertura vegetal que funciona como sumidero de carbono, ya que tiene la capacidad de secuestrarlo y transformarlo en biomasa para su desarrollo. Este estudio pretende conocer el papel de la porción principal del Parque Ecológico de la Ciudad de México (PECM) como sumidero de carbono a través de la biomasa aérea presente en tres comunidades vegetales. Para el matorral conservado se hicieron proyecciones de almacén de biomasa aérea realizados previamente en el adyacente Parque Ecoguardas, el cual presenta las mismas condiciones ambientales (9.90 ± 2.60 Mgps/ha y 4.70 ± 1.20 Mg C/ha). Para el matorral xerófilo sucesional se hizo un muestreo aleatorio estratificado: en el estrato arbóreo y arbustivo se realizó un análisis dimensional con ecuaciones que permiten estimar biomasa a partir de las medidas de su talla, y en el estrato bajo se realizó el método de cosecha. Para el bosque de encino se elaboraron modelos que predijeran la biomasa aérea total a partir de la cobertura, área basal y densidad de los árboles. Se encontró que el matorral conservado almacena en total 1,364 Mgps y 641 Mg C. Por otro lado, el matorral sucesional almacena 63.00 ± 43.80 Mgps/ha y 29.61 ± 20.59 Mg C/ha, concentrado principalmente en los tallos de los árboles. Por último, en el encinar se encontró que la suma del área basal de los árboles (ΣAB) es el mejor predictor para calcular biomasa seca total (WT): $W_T = 6094.2 (\Sigma AB) + 285.1$ ($r^2 = 0.612$, $P < 0.005$), y que éste acumula 629.17 ± 106.30 Mgps/ha y 295.70 ± 49.96 Mg C/ha. Agrupando los datos, el PECM almacena 86,644 Mg de biomasa seca aérea y 40,723 Mg de carbono. Los valores encontrados de biomasa aérea por hectárea se ubican dentro de los intervalos reportados para ecosistemas similares que son considerados reservorios de carbono, por esta razón es importante conservar y reconocer al PECM como una zona estratégica para la captura de C y mitigación de GEI en la Ciudad de México.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El carbono en el Antropoceno

Las emisiones masivas de carbono que los humanos han efectuado desde el siglo XVIII sobre el planeta ha modificado severamente la dinámica natural de la atmósfera, hidrósfera, litósfera y biósfera (Mendivelso y Arias, 2015). Esta transformación en la Tierra ha sido tan relevante que los científicos de la Comisión Internacional de Estratigrafía han establecido el comienzo de una nueva era geológica, conocida como el Antropoceno, los investigadores ubican este inicio en 1750 con el comienzo de la Revolución Industrial (Chapin *et al.*, 2011).

Actualmente, estamos presenciando un incremento acelerado de la temperatura de la Tierra (Frank, 2011; Mendivelso y Arias, 2015) debido a las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI); (IPCC, 2007a) emitidos por actividades humanas (Alfaro *et al.*, 2014), entre los que se cuentan el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos (Ordóñez y Masera, 2001). Algunos de estos compuestos, como el CO₂, CH₄ y N₂O (óxido de nitrógeno), tienen una influencia en el clima a largo plazo, ya que éstos dominan en la atmósfera como consecuencia de su estructura química que los convierte en compuestos estables con periodos de vida largos que van desde décadas hasta siglos (Alfaro *et al.*, 2014). El CO₂ tiene dos escalas de tiempo en su ciclo biogeoquímico, una biológica que implica un periodo relativamente corto que va desde días hasta miles de años, y una geológica que tiene una escala de millones de años (SEMARNAT, 2009), por lo que no tiene un periodo específico de eliminación en la atmósfera (IPCC, 2007a).

Del total de GEI, el CO₂ contribuye con 50 al 75%, y existe un incremento de su concentración en la atmósfera de 228 ppm a 340 ppm entre 1750 y 1980 (Hansen *et al.*, 1981; Castro *et al.*, 2002), y actualmente se encuentra por en los 409.5 ppm (ESRL, 2018). Este aumento está principalmente relacionado con el consumo de combustibles fósiles (Hansen, 1981), pues hubo un incremento en el mundo de 14 a 27 mil mega toneladas de CO₂ de 1971 a 2005 como consecuencia de la combustión de hidrocarburos (SEMARNAT, 2009).

México, en particular, durante 2013 emitió 665,336 gigatoneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq), que representa 1.4% de las emisiones de GEI a nivel global, ubicándose en la posición 12 (IMCO 2016, 2015; Duhne, 2016). El CO₂eq es una unidad que indica la cantidad de toneladas de GEI en la atmósfera, se le

llama CO₂eq porque los gases distintos del CO₂ son convertidos a un valor que equivale a este elemento, se transforman a través de multiplicar la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global. Los gases se transforman a CO₂ ya que es el elemento dominante de los GEI (Brander, 2012). Del total de emisiones del país, 92% provienen de la quema de hidrocarburos y el 8% restante del cambio de uso del suelo, de los cuales 45% de dichas emanaciones van a la atmósfera, 27% al mar y otro 27% es capturada por los bosques (CNN, 2015).

Villers y Trejo (2000), en un estudio sobre la vulnerabilidad de bosques de México ante el cambio climático, encontraron que los bosques de zonas templadas frías y semicálidas son los más afectados por el aumento de la temperatura, por lo cual desaparecerán de seguir esta tendencia actual. Estos sistemas forestales tienen la posibilidad de mitigar los GEI, puesto que son capaces de almacenarlos y funcionar como sumideros de carbono (Figuroa, 2010).

1.2. El carbono y el efecto invernadero

La vida en la Tierra depende, en gran parte, de la atmósfera, que es una capa delgada compuesta por una mezcla de gases (Aguilar, 2004), principalmente formada por nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%), pequeñas cantidades de argón (0.93%), y el pequeño porcentaje restante lo constituyen el vapor de agua, ozono, CO₂, hidrógeno, neón, helio y kriptón (SEMARNAT, 2009). La atmósfera tiene un papel fundamental, pues regula la temperatura del planeta por medio del *efecto invernadero* (SEMARNAT, 2009; Figura 1). Este fenómeno ocurre cuando la radiación alcanza la superficie de la Tierra y se transforma en calor, posteriormente esa energía es reemitida de nuevo a la atmósfera, y una parte es detenida por los GEI, lo que incrementa la temperatura de la Tierra (SEMARNAT, 2009), en este sentido, la concentración de gases en la atmósfera tiene una influencia directa en el clima (Magaña, 2004).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014 por sus siglas en inglés) en su informe sobre tendencias de GEI indicó que, a pesar de los esfuerzos empleados para mitigar el cambio climático, la concentración de CO₂ sigue en aumento. Durante 30 años, de 1970 a 2000, hubo un aumento promedio anual de 0.4 de gigatoneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂eq), que representa 1.3% por año; y de 2000 a 2010 este aumento anual creció a 1.0 GtCO₂eq (2.2%). También se señaló que de 1970 a 2010, el 78% de GEI estuvo representado por CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales (Figura 2).

Entre las consecuencias más graves del calentamiento global está la extinción masiva de especies (UNFCCC, 2014) y los efectos negativos en la salud humana (Andrasko, 1990), como resultado de una mayor frecuencia de tormentas severas, cambios en la actividad ciclónica, aumento del nivel del mar por la fusión del hielo de los casquetes polares que altera el ciclo hidrológico, lo que acarrea problemas en la disponibilidad y calidad de agua (IPCC, 2014), alimento (FAO, 2008) y surgimiento de enfermedades (Sanderson, 1992).



Figura 1. Procesos involucrados en el efecto invernadero. Fuente: SEMARNAT (2009).

1.3. El papel del carbono en los ecosistemas terrestres

Gran parte de las funciones de los seres vivos dependen del uso de la energía (Phillipson, 1966). La radiación solar es la mayor fuente de energía en la Tierra (González, 2009), la cual es captada por los tejidos fotosintéticos de las plantas para secuestrar CO_2 de la atmósfera y transformarla mediante el

proceso de fotosíntesis en materia orgánica e incorporarlo como parte de sus tejidos para su desarrollo (Odum, 2006; Fernández, 2008). Esta biomasa presente en las plantas representa el carbono almacenado de la atmósfera, y la cantidad de recursos disponibles para los heterótrofos (Lindeman, 1942; Odum, 2006). Se estima que entre el 45 y el 50% del peso (materia seca) de los seres vivos está formado por carbono (Montero *et al.*, 2005).

El carbono secuestrado por la vegetación está en constante flujo, ya sea a través de los consumidores que lo regresan a la atmósfera por respiración y descomposición de sus desechos o por la desintegración de los restos vegetales y el mantillo, regresándolo así al inicio del ciclo (SEMARNAT, 2009; Figura 3).

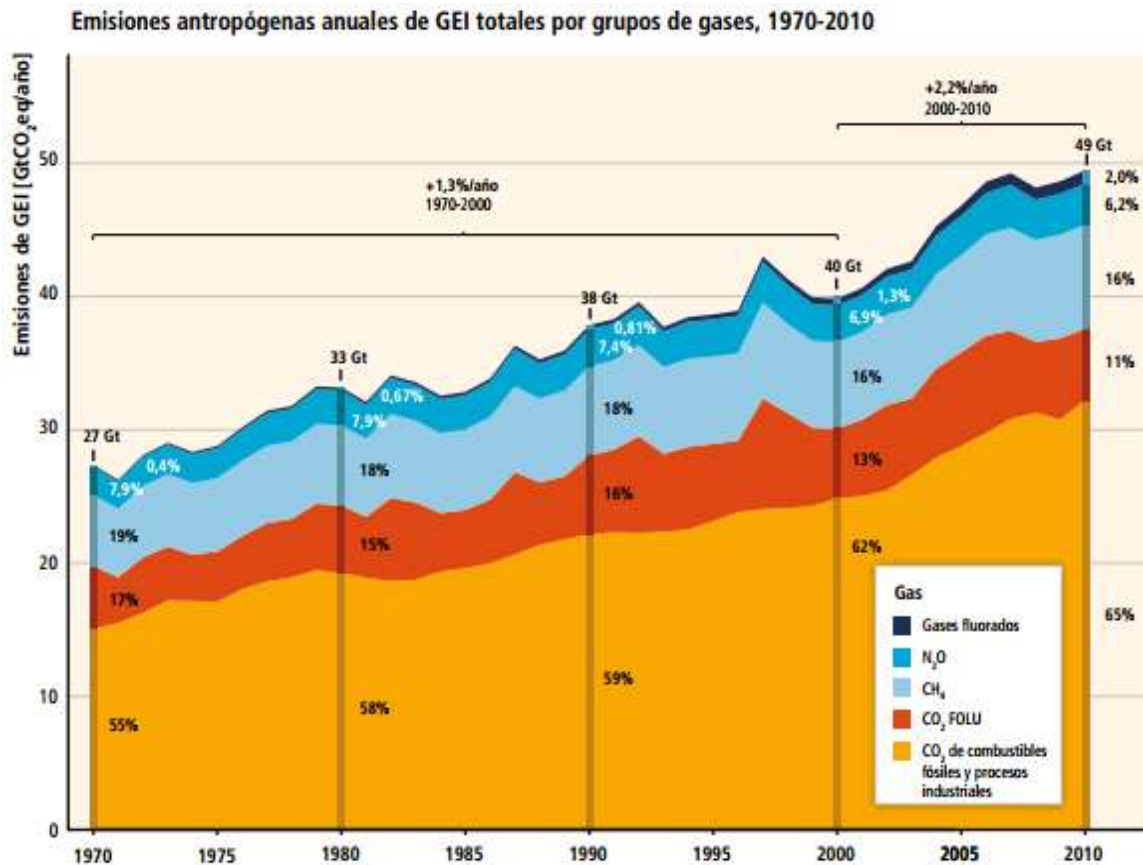


Figura 2. Emisiones antropogénicas anuales de GEI totales (GtCO₂eq/año) por grupos de gases, 1970-2010: CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales. Fuente: IPCC (2014).

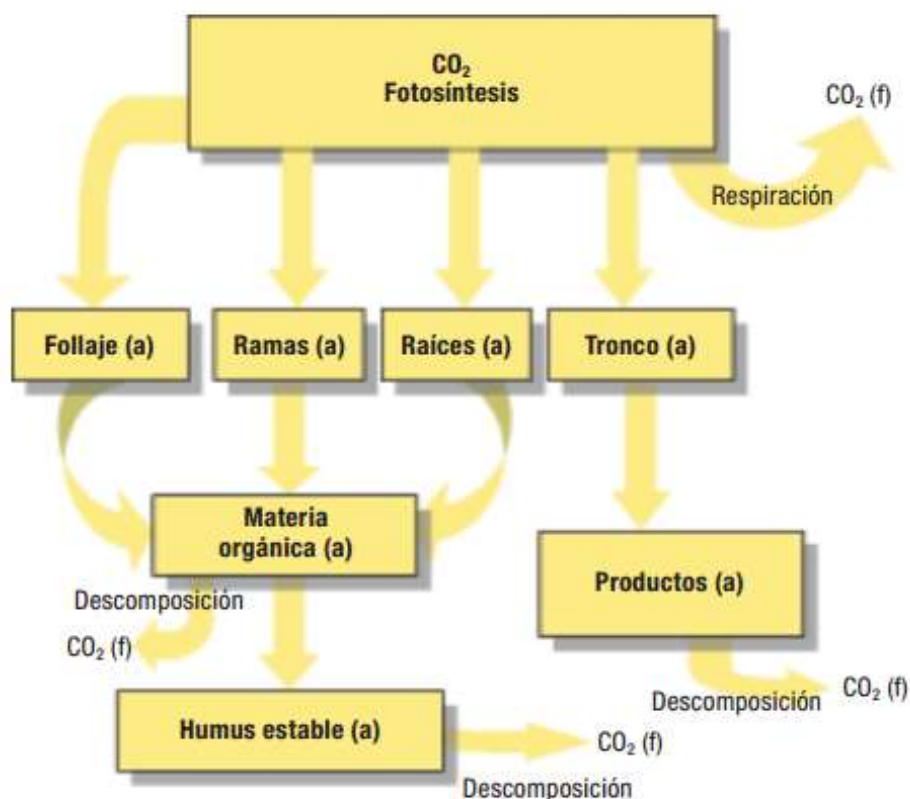


Figura 3. Flujos (f) y almacenes (a) de C en un ecosistema forestal. Fuente: Ordóñez (1998).

La distribución del carbono almacenado en las plantas se encuentra dividido en cuatro componentes generales: vegetación aérea y radicular, materia en descomposición o mantillo, suelos y productos forestales (Apps *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1994). Existe evidencia de que el componente aéreo del estrato arbóreo es uno de los que mayor biomasa acumula. Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) encontraron que en un bosque de pino-encino de Tamaulipas, México, el componente aéreo, que incluye fuste, ramas y hojas (Ordóñez, 2015), fue el que más almacenó carbono con un porcentaje de 75.3% (82.9 tC ha⁻¹)¹ en comparación con el componente radicular que contribuye con el 15% (16.5 tC ha⁻¹) y el mantillo con 9% (9.8 tC ha⁻¹). Por su parte, Mendoza-Ponce (2008) obtuvo un aporte de biomasa arbórea aérea que oscilaba entre 81-97%, mantillo entre 1-16% y radicular fina (<2 mm de grosor) 1-3% en un bosque de pino en Veracruz, México. Por otro lado, Schlegel (2001) encontró que en los bosques perennifolios del centro sur de Chile la biomasa aérea representa el 70% del carbón acumulado, las raíces 17-25% y la necromasa, el mantillo y el sotobosque 3.93%.

¹ 1 tonelada de carbono = 3,667 toneladas de CO₂ (IPCC, 2014).

Existen variables que afectan la capacidad de las plantas para generar biomasa. Stephenson *et al.* (2014) observaron que, para la mayoría de las especies de un bosque tropical, la tasa de acumulación de biomasa aumenta continuamente con el tamaño del árbol, lo que indica que árboles de edades avanzadas contienen grandes cantidades de carbono. Schulze *et al.* (2000) discuten que esto se debe a que el ciclo de carbono en los bosques está impulsado por el recambio de hojas y raíces, lo cual contribuye a almacenar mayores cantidades de carbono orgánico a menos que éste sea perturbado por la tala o incendios. Otros factores que afectan el almacenamiento de carbono son la densidad de la vegetación, humedad del aire, calidad del suelo y las condiciones de estrés, como temperaturas extremas, ya que alteran el metabolismo de las plantas (Ordóñez, 1999; Martínez-Ballesta *et al.*, 2009). Esto quiere decir que para conocer la cantidad de carbono almacenado, la productividad y la salud de las comunidades vegetales se deben tener en cuenta todas estas variables que las afectan (Andrasko, 1990; Brown, 1997).

La biomasa aérea puede ser estimada con dos técnicas diferentes: el directo y el indirecto (Picard *et al.*, 2012). El primero consiste en cortar una muestra representativa de ejemplares y determinar el peso seco y extrapolar los datos a toda el aérea que se quiere analizar; el segundo, por su parte, se utiliza cuando las dimensiones de los árboles son muy grandes o cuando no se puede o requiere cortar la muestra, se obtiene la biomasa por medio de análisis de regresión entre variables de la talla de las plantas medidas en campo y el peso seco de las mismas (Brown, 1997).

1.4. Ecosistemas terrestres como sumideros de carbono

Los seres humanos obtenemos bienes y servicios provenientes de los elementos bióticos y abióticos que conforman los ecosistemas, tales como la recarga de los mantos acuíferos, polinización, generación y renovación de suelos, estabilización del clima, belleza escénica, estimulación intelectual y ciclo biogeoquímicos los cuales garantizan el bienestar humano (MEA, 2003). Uno de los ciclos biogeoquímicos es el ciclo del carbono (Figura 4) en el cual se lleva a cabo secuestro del carbono por parte de la vegetación y los microorganismos del suelo (SEMARNAT, 2013). Este servicio ecosistémico es medido como una tasa de asimilación de CO₂ por unidad de tiempo (McPherson, 1999). Si la tasa de asimilación es más rápida que la tasa de respiración y descomposición, este ecosistema es considerado como un sumidero; de lo contrario, constituirá una fuente de emisión (SEMARNAT, 2013). El concepto de sumidero de carbono en relación a los gases de efecto invernadero se adoptó en 1992 en la Convención Marco sobre Cambio Climático definido como cualquier sistema o proceso por los cuales se extrae de la atmósfera dióxido de

carbono y se almacena, así bien los bosques naturales son sumideros naturales de carbono (Figuroa y Redondo, 2007).

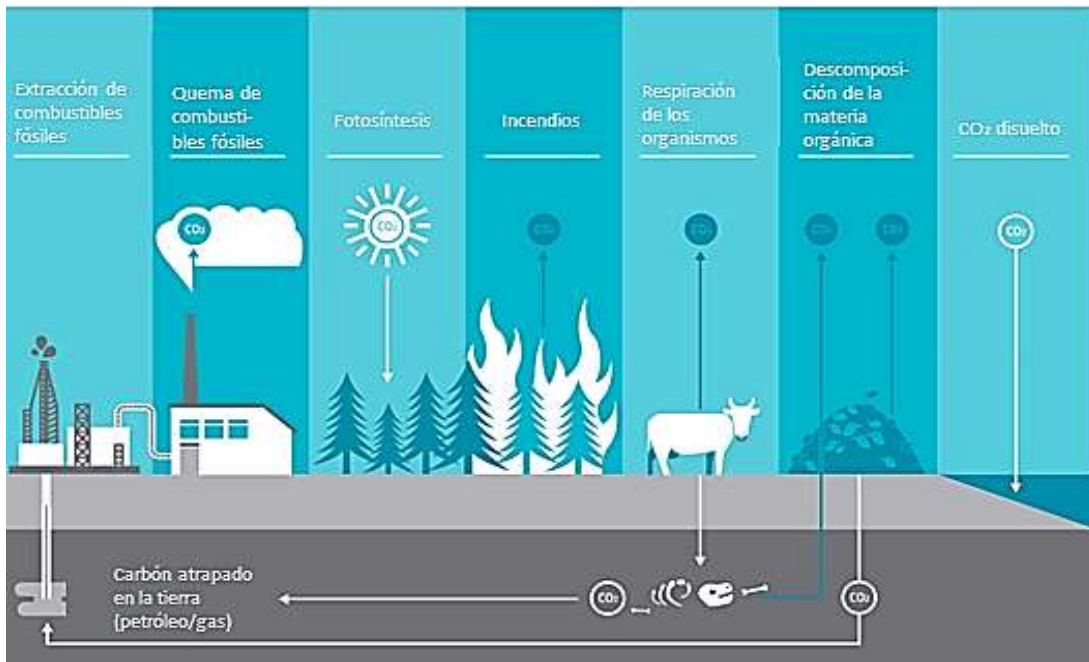


Figura 4. Ciclo del carbono. Fuente: AE (2016).

Los diferentes ecosistemas tienen distintas capacidades para actuar como sumideros de carbono. Los manglares, por ejemplo, son el tipo de vegetación que tienen más capacidad de capturar carbono (Ezcurra *et al.*, 2016). Sin embargo, de los ecosistemas terrestres los bosques son considerados los más importantes sumideros de carbono (IPCC, 2007b; Figura 5), se ha calculado una diferencia de 10 a 100 veces más (Maser *et al.*, 1997), puesto que asimilan cerca del 45% del total de carbono a nivel global (Gorte y Ramseur, 2010). Bajo el supuesto de estimaciones mundiales se indica que, si se logrará detener la eliminación de la cobertura vegetal y si se conservarán los bosques maduros, del 24 al 35% de las emisiones de carbono procedente de combustibles fósiles y la producción industrial de 2000 a 2010 podría ser mitigado (Chazon *et al.*, 2016). Por su parte, Bellón *et al.* (1993), al hacer un análisis sobre el potencial de captura de carbono de los ecosistemas de México, estimaron que se pueden lograr cantidades de captura de carbono de 3,500 a 5,400 millones de toneladas en un periodo de 100 años, esto siempre y cuando (1) se mantengan en buen estado las áreas naturales protegidas (actualmente 10.6% del territorio continental; CONANP, 2018), (2) se realicen planes de manejo para aprovechar los recursos naturales forestales de manera sustentable y (3) se mantengan en buen estado los bosques asignados a fines de conservación. Brown (1997), por su parte, opina que los bosques pueden dejar de ser sumideros y

convertirse en fuentes de carbono. Las causas de esta conversión son la remoción de árboles, el cambio de uso de suelo, la erosión, las plagas y las enfermedades que afectan la capacidad de la vegetación para capturar C y los incendios. En otro estudio, Lugo y Brown (1992) discuten que cuando los bosques son transformados, ya sea por causas naturales o humanas, pasan a uno de los dos estados posibles: proceso de sucesión secundaria y aprovechamiento para uso no forestal, como la agricultura y ganadería, en todos los cuales se emite más carbono de lo que se capta. Los autores discuten que los niveles de absorción de C están en función de la velocidad de sucesión y las condiciones ambientales, que los bosques secundarios se recuperan más rápidamente que los terrenos completamente deforestados y que los utilizados para uso no forestal tienen menos probabilidades de actuar como sumideros de carbono.

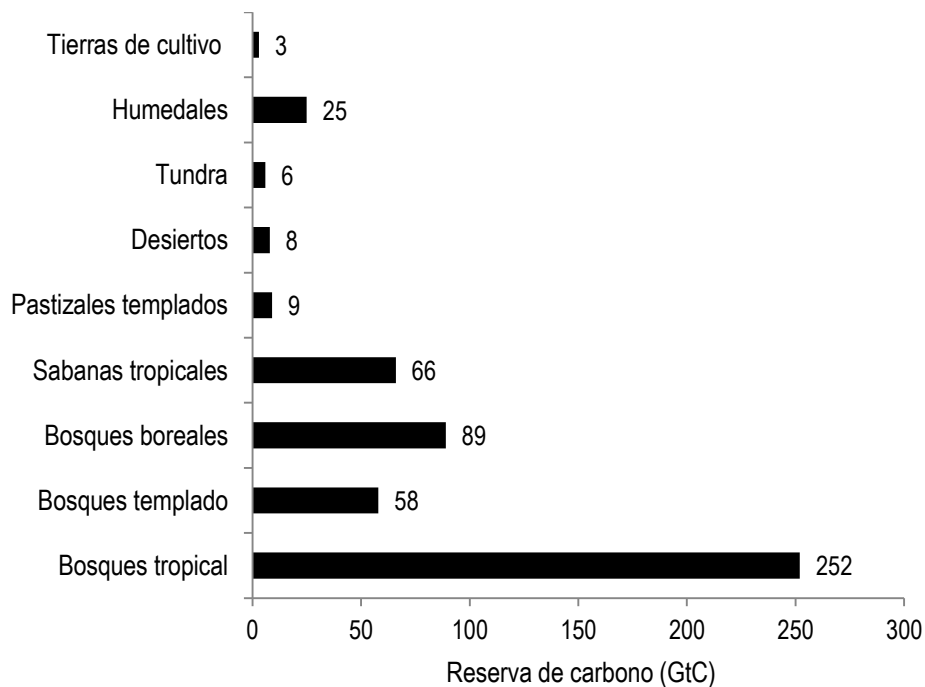


Figura 5. Almacenamiento de carbono en la vegetación para diferentes tipos de ecosistemas. Fuente: IPCC (2007a).

1.5. El Parque Ecológico de la Ciudad de México

El “Pedregal de San Ángel” o “Pedregal del Xitle” se ubica al sur de la Ciudad de México en la cuenca hidrográfica del Valle de México (Rzedowski, 1954; Cano-Santana *et al.*, 2006). Se originó como consecuencia de la erupción del volcán Xitle ocurrida en el año 1688 ± 35 , con un área de 80 km^2 (Siebe, 2009). El tiempo de enfriamiento de la lava y los accidentes topográficos permitieron la heterogeneidad del sustrato (oquedades, grietas, hoyos, planicies, hondonadas), lo que creó una gran variedad de microambientes (Carrillo-Trueba, 1995); sin embargo, el sustrato tiene poca capacidad para retener humedad, por lo que en temporada de secas se asemejan las condiciones a las de zonas áridas, por lo que allí se establecieron especies características de los matorrales xerófilos; sin embargo, por la altitud, el clima templado y una mayor precipitación habitan especies de otros tipos de vegetación (Peralta-Higuera y Prado-Molina, 2009). Dada esta variedad de condiciones, en el Pedregal se desarrollaron diversas comunidades vegetales (Cano-Santana *et al.*, 1999). Rzedowski (1954) identificó nueve tipos de vegetación, entre los que predominan por su extensión el matorral de palo loco *Pittocaulon* (ex *Senecio*) *praecox* y los bosques de encino de *Quercus rugosa* (Cano-Santana *et al.*, 2006). Los matorrales se asientan en las altitudes más bajas donde las condiciones son calurosas y secas, y los bosques en zonas más húmedas y frías en las partes más elevadas (Rzedowski, 1991; Cano-Santana *et al.*, 2006). En este pedregal hay cinco zonas protegidas (Cano-Santana *et al.*, 2006) (Figura 6), entre ellas el Parque Ecológico de la Ciudad de México (PECM) con 727.61 ha (Lot y Camarena, 2009). Éste se decretó en 1989 para detener el avance urbano y la perturbación de más de 200 ha que provocó, desde 1980, un asentamiento urbano conocido como “Lomas del Seminario” (Mendoza-Hernández *et al.*, 2016).

1.6 Justificación

Es importante identificar los sumideros de carbono inmersos en una megalópolis, pues ahí, en las ciudades mundiales se asienta 50% de la población humana y como consecuencia liberan una alta cantidad de CO_2 a la atmósfera, esto porque hay reemplazo de zonas con vegetación por asentamientos urbanos y quema de combustibles para la producción de energía y transporte (Cañas y Cárdenas, 2013). Ante este panorama, los bosques en zonas urbanas mejoran la calidad del aire de dos maneras: 1) a través de las ramas y troncos que interceptan las partículas suspendidas y hojas que las atrapan físicamente, especialmente si son cerosas, espinosas o pubescentes, y 2) a través de la fotosíntesis que libera oxígeno a la atmósfera (Martínez, 2011).

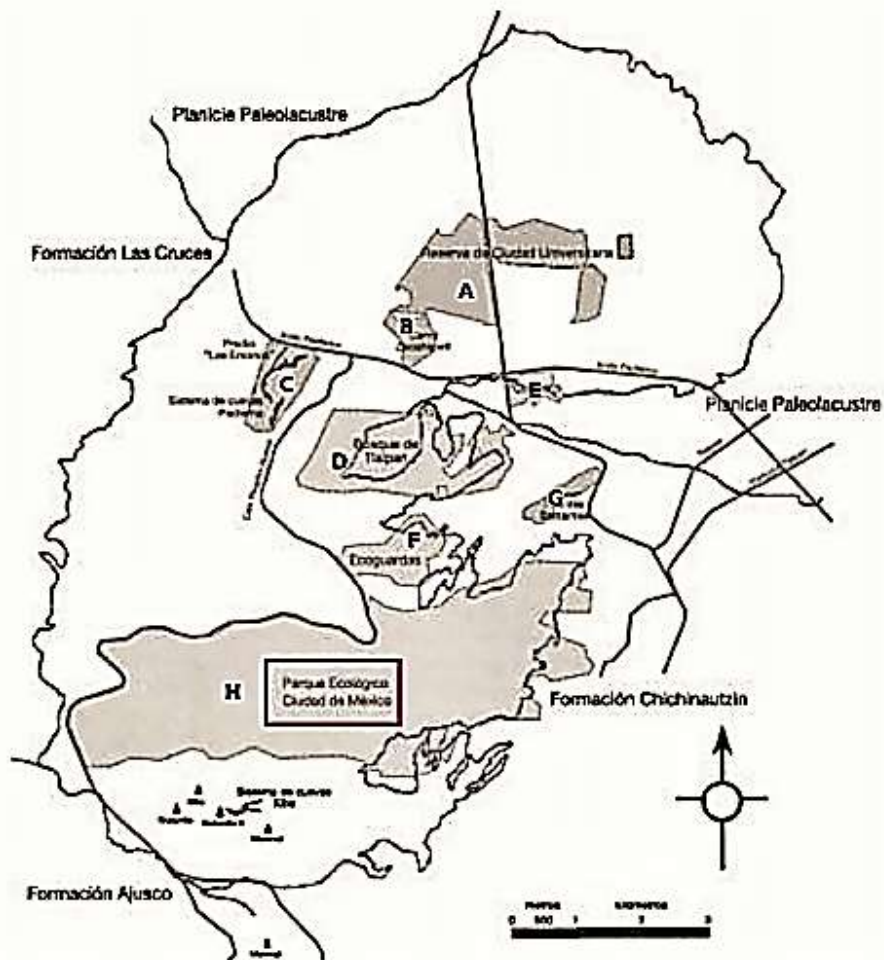


Figura 6. Ubicación aproximada de las áreas naturales protegidas ubicadas en o cerca del derrame del Xitle. A) Reserva de Ciudad Universitaria, B) Cerro Zacaltépetl, C) Sistemas de cuevas Padierna, D) Bosque de Tlalpan, E) Cuicuilco, F) Ecoguardas, G) Fuentes Brotantes y H) Parque Ecológico de la Ciudad de México. Fuente: Cano-Santana *et al.* (2006), modificada por Granados (2015).

Por otro lado, se desconoce el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea en bosques de encinos y matorral xerófilo en el PECM, así como su potencial como sumidero de carbono, su capacidad para reducir GEI y amortiguar los efectos del cambio climático. Por lo anterior, la presente investigación contribuye a la valoración de este servicio ecosistémico, en el contexto de la cercanía con la megaciudad de México. La determinación periódica de la capacidad para almacenar carbono es importante debido a que pueden ocurrir cambios negativos en periodos de tiempo muy cortos en los ecosistemas por

alteraciones humanas que contribuyan a la liberación de CO₂ en lugar de almacenarlo (Brown y Lugo, 1992; Brown, 1997).

La estimación de la cantidad de biomasa y de carbono almacenado en la vegetación permite conocer la productividad y la salud de las comunidades vegetales del Parque Ecológico de la Ciudad de México, ya que las condiciones de estrés, como la contaminación del aire, afectan los procesos fisiológicos de absorción de CO₂ y, como consecuencia, el desarrollo de la vegetación (Martínez-Ballesta *et al.*, 2009).

Finalmente, es importante darle argumentos a la sociedad para que comprenda que la conservación y reforestación de áreas de vegetación constituyen una buena vía para la reducción de este gas de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático (Bellón *et al.*, 1993).

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es conocer el papel del PECM como sumidero de carbono y su capacidad para reducir GEI. Los objetivos particulares son los siguientes:

1. Cuantificar la biomasa y la cantidad de carbono que es almacenado en fitomasa aérea en tres unidades de vegetación del PECM: bosque de encino, matorral xerófilo sucesional y matorral xerófilo conservado.
2. Determinar la cantidad de materia seca y carbono que se almacena en distintos componentes de la vegetación en el matorral en proceso de sucesión.
3. Calcular la cantidad de biomasa aérea y carbono acumulado por hectárea en cada estrato dentro el matorral sucesional.
4. Comprobar la existencia de dos tipos de bosque, abierto y cerrado, a través de la densidad de árboles, área basal y cobertura de la copa.

3. MÉTODOS

3.1. Sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México, área natural protegida también conocida como “Ajusco Medio” (Cano-Santana *et al.*, 2006), que se localiza a la altura del Km 6 de la carretera Picacho-Ajusco (Bonfil *et al.* 2003) al norte de la delegación Tlalpan (19°16'23”–19°14'37” N y 99°14'35”–99°10'31” O) (Mendoza-Hernández *et al.*, 2013). El derrame de lava del volcán Xitle abarca 727.61 ha, con una elevación entre los 2,375 y 2,875 m s.n.m (Mendoza-Hernández *et al.*, 2016). El clima es templado húmedo, la temperatura anual promedio es 11.1°C, existen dos estaciones marcadas: una de lluvias que va de mayo a octubre, y una de secas de noviembre a abril. Adicionalmente, pueden presentarse precipitaciones irregulares en invierno. La precipitación anual es de 1,100 mm (Siebe *et al.*, 2016).

El derrame de lava cubrió gran parte de la superficie, desde las laderas del Ajusco hasta extensas áreas de planicies del Valle de México, por lo que presenta en su mayoría sustrato de roca ígnea basáltica y en menor proporción tres tipos de suelo: Litosol, Feozem húmico y Andosol húmico (Mendoza-Hernández *et al.*, 2013). Debido a la predominancia de suelos basálticos y el poco desarrollo de materia orgánica, la zona perdió valor para la agricultura, donde los urbanistas encontraron gran utilidad para la construcción de asentamientos urbanos (Cano-Santana *et al.*, 1999). El mayor crecimiento urbano se presentó en 1980, lo que alteró el matorral xerófilo de manera profunda (Pisanty *et al.*, 2009). Después de la suspensión de las construcciones humanas en el PECM, se identificaron inmersos tres tipos de vegetación: 1) el bosque de encino, 2) el matorral xerófilo perturbado (actualmente y de manera clara en proceso de sucesión), y 3) el matorral xerófilo conservado de siempreviva (*Sedum oxypetalum*) (Soberón *et al.*, 1991; Cano-Santana *et al.*, 2006; Figura 7).

3.2. Carbono y biomasa en pie

El estudio se realizó en la porción principal del PECM, que abarca 506.7 ha, equivalente al 70% del área total. Los métodos para calcular biomasa aérea en pie y almacén de carbono se separan de acuerdo con el tipo de vegetación, según se expone a continuación. Se utilizaron proyecciones de la biomasa obtenida por L.A. Orozco-Flores (en prep.) para el Parque Ecoguardas, adyacente al PECM (Figura 8), el cual registró condiciones ambientales muy similares. El Parque Ecoguardas (150 ha; 19° 16'18” N, 99° 11' 55” O, 2,420-2,600 m s.n.m.) tiene dos tipos de vegetación: bosque de encino y matorral xerófilo, un clima

templado subhúmedo, una temperatura de 11.5 °C y una precipitación anual de 1,200 mm distribuyéndose de manera desigual en dos temporadas marcadas: una de lluvias que abarca desde junio a octubre y otra de secas que va de noviembre a mayo (Santillán, 2004; GODF, 2006).

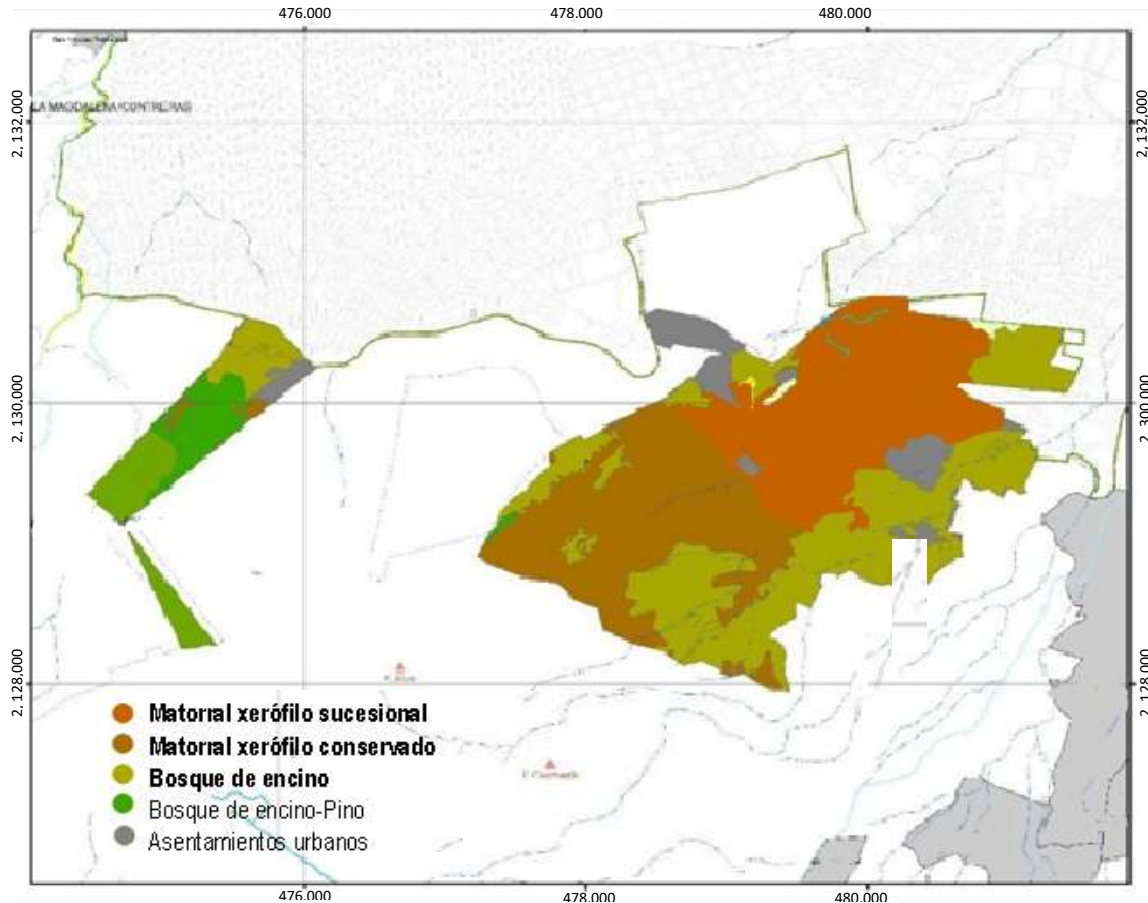


Figura 7. Extensión y tipos de vegetación en el trazo actual del PECM. En las zonas más bajas se encuentra el matorral xerófilo sucesional y conservado (2375 m s.n.m.) y en las zonas medias y altas se asienta el bosque de encino (2650 – 2875 m s.n.m). La zona de estudio es la fracción más extensa localizada al este. Fuente: GOCM (2016)

3.2.1. *Matorral xerófilo conservado*. Este tipo de vegetación está representado en el Parque Ecoguardas (PE), se identifica por una mayor densidad de estrato herbáceo y escasez de estrato arbóreo (GOD, 2011), con abundancia de especies nativas como *Sedum oxypetalum*, *Agave inaequidens*, *Opuntia tomentosa* y *Pittocaulon praecox* (Bonfil *et al.*, 1997). Para calcular la cantidad de carbono y biomasa aérea que almacena el matorral conservado del PECM se realizó una relación de proporciones con la cantidad de carbono y biomasa aérea acumulada por hectárea registrada por Orozco-Flores y Cano-Santana (2017) en

el Parque Ecoguardas y el área que ocupa el matorral conservado en el PECM. El área que ocupa cada tipo de vegetación del PECM se obtuvo mediante el programa Mapa digital V6.3 (INEGI, 2017). Se delimitó el polígono que ocupa el matorral xerófilo conservado y perturbado gracias a lo señalado por el Dr. Pedro Eloy Mendoza Hernández, quien tiene experiencia en la ubicación de las zonas destruidas por la urbanización, pues actualmente es difícil determinarlas a simple vista por lo avanzado del proceso de sucesión secundaria.

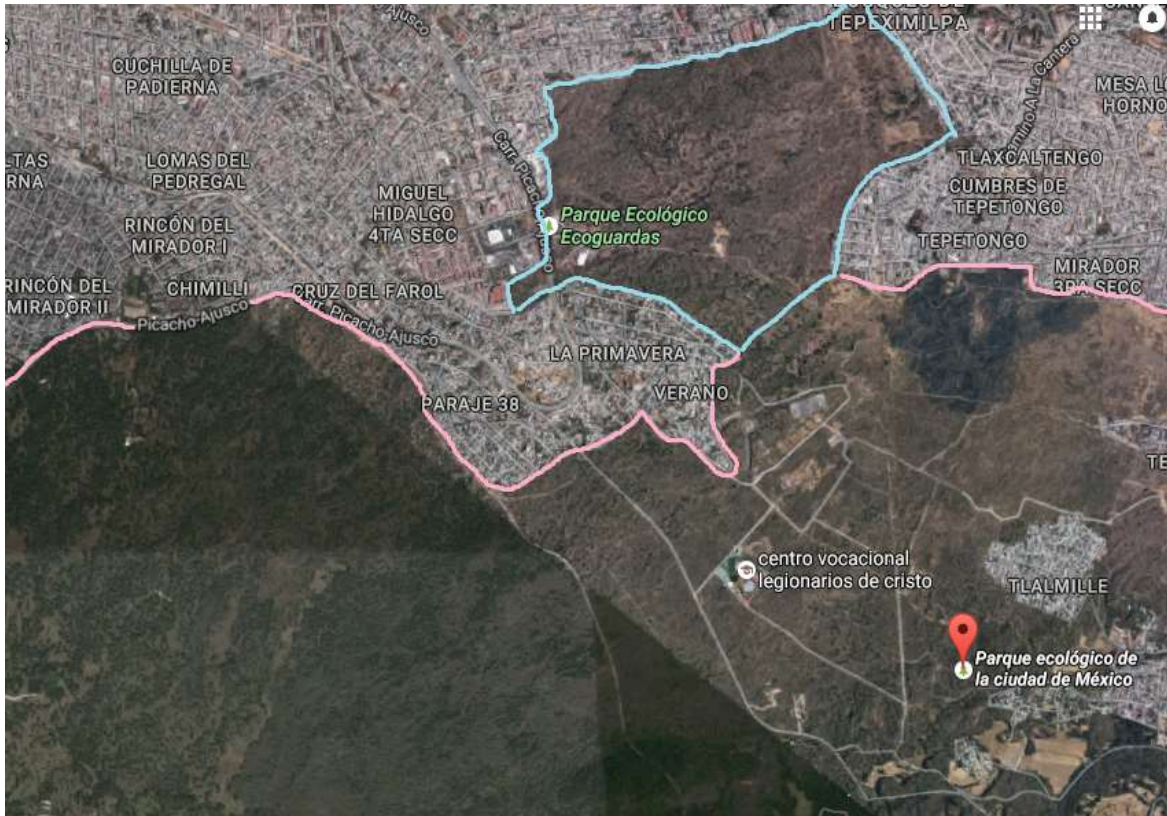


Figura 8. Foto aérea que muestra la ubicación espacial del Parque Ecoguardas (delimitado con azul) y del Parque Ecológico de la Ciudad de México (delimitado con rosa). Fuente: Google Earth (2016).

3.2.2. *Matorral xerófilo sucesional*. Es un matorral que fue perturbado, en el cual la mayor parte de la vegetación fue eliminada y actualmente se encuentra en proceso de sucesión, tiene una cobertura arbórea de porte bajo que cubre <50% de la superficie. Surge como consecuencia de construcciones urbanas. La zona se identifica por remanentes de casas, caminos, marcas de incendio, remoción de tierra, basura y cascajo. En cuanto a la flora dominan *Buddleja cordata* (tepozán), *Buddleja parviflora* (teponzancillo), *Dodonaea viscosa* (chapulixtle), *Pittocaulon praecox* (palo loco), *S. oxypetalum* (Siempre viva) *Pennisetum clandestinum* (pasto kikuyo) y *Furcreaea bedinghausii* (cabuya) (Bonfil et al., 1997).

Se determinó la biomasa del matorral sucesional a través de un muestreo aleatorio estratificado de nueve cuadros de 100 m². Los tipos de estratos se definieron de acuerdo con el método empleado por Cano-Santana (1994) y modificado por L.A. Orozco-Flores (en prep.), que se expone a continuación:

1. Estrato arbóreo. A este grupo pertenecen las plantas leñosas y monopodiales que miden >250 cm de altura.
2. Estrato arbustivo. Se consideran todos los arbustos con tallos leñosos perennes y plantas suculentas que miden >30 cm y plantas arbóreas con una altura >30 cm y <250 cm.
3. Estrato bajo. Se concentran todas las hierbas anuales y perennes de cualquier altura y plantas suculentas y leñosas <30 cm.

La estimación de la biomasa en árboles y arbustos se realizó por medio de un análisis dimensional (método indirecto) y la biomasa del estrato bajo a través de cosecha (método directo), donde se pesa directamente cada componente.

Con ayuda de una foto aérea del Parque Ecológico de la Ciudad de México se ubicaron al azar nueve cuadros de 10 × 10 m cada uno, en cada uno de los cuales se midieron las plantas arbóreas. A su vez, dentro de cada cuadro de 10 × 10 m, se seleccionó al azar un subcuadro de 5 × 5 m en uno de sus vértices, donde se midieron todas las plantas del estrato arbustivo. Por último, dentro del cuadro de 5 × 5 m, se seleccionaron al azar dos subcuadros de 1 × 1 m, en el que se cosecharon las plantas del estrato bajo (Figura 9).

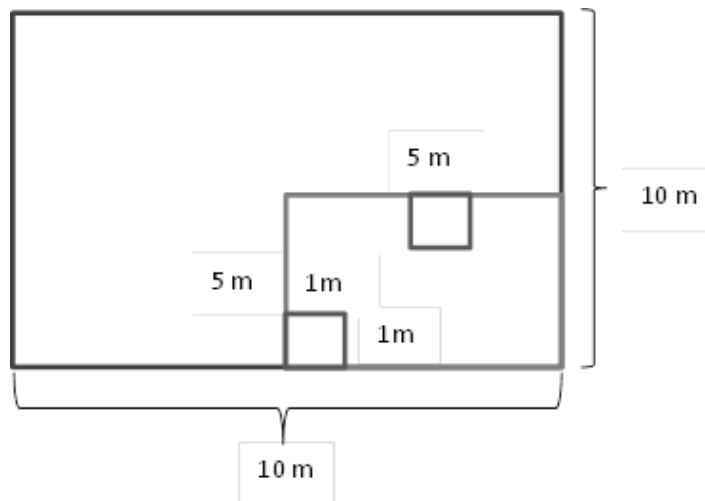


Figura 9. Ejemplo de muestreo estratificado para medir biomasa en matorral xerófilo sucesional.

3.2.2.1. *Análisis dimensional de árboles y arbustos.* El método indirecto se basa en utilizar ecuaciones que permiten relacionar variables que son medidas en la vegetación con la biomasa (Cano-Santana, 1994). En este estudio se usaron las ecuaciones alométricas obtenidas por Cano-Santana (1994) para plantas perennes características de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (Apéndice 1). Los modelos sirven para determinar por separado la biomasa tanto leñosa como foliar.

La biomasa seca leñosa y foliar se calculó con ecuaciones específicas para cada especie. Se registraron y marcaron todos los individuos del estrato en cuestión que se encuentre dentro del cuadro correspondiente.

1. Biomasa leñosa. Del estrato arbóreo se midieron las variables altura total (AT), altura a la primera rama (AR), diámetro a la altura del pecho (DAP) y diámetro del tallo a los 30 cm del suelo de individuo. En cuanto al estrato arbustivo se midieron las variables altura y número total de tallos a los 10 cm del suelo, así como el diámetro de éstos. Existen arbustos que cuentan con más de 15 ramas, para éstos solamente se eligieron de manera aleatoria 15 de ellas y se midió su diámetro a los 10 cm. Se realizó la toma de medidas en marzo-abril ya que el leño en época de lluvias absorbe agua y hace que se registren mayores valores de diámetro.
2. Biomasa foliar. Para calcular la cantidad de biomasa seca en hojas se utilizó como variable la longitud de los retoños foliares, los cuales son definidos como cada meristemo activo de la planta con al menos dos hojas con un nivel de desarrollo alto, y se toman en cuenta talluelos, estípulas y hojas (Cano-Santana, 1994; Figura 10). Tales retoños foliares tienen su máximo pico de acumulación de biomasa en temporada de lluvias (Cano-Santana, 1994), por lo que se tomaron las medidas y el conteo de éstos en octubre de 2016.

Para los árboles se contaron los retoños foliares de una fracción de la copa y se extrapoló la biomasa a todo el volumen de la misma, sin embargo este método de proyectar el número de retoños puede llegar a sobrestimar o subestimar los retoños totales en árboles de copa monocapa, ya que en este tipo de copa los retoños se concentran mayormente en la parte externa, por ese motivo se recomienda utilizar una rama alícuota lo suficientemente grande donde no sólo se concentren los retoños de la superficie o bien contar todos los retoños de la copa (Z. Cano-Santana, com. pers.). *Buddleja cordata* tiene copa monocapa y no se realizó el conteo de todos los retoños foliares de la copa sino que se usó una rama alícuota, lo que provocó una sobrestimación del número de retoños, en este caso se realizó una regresión

con los datos obtenidos por Cano-Santana (1994) para determinar cómo afecta el perímetro a la altura del pecho (PAP) del tronco al número máximo de retoños foliares que puede tener *B. cordata*.



Figura 10. Retoño foliar de *Quercus rugosa*. Foto: D.L. Manríquez.

Para calcular el volumen de la copa de todos los árboles se midieron los diámetros (d_1 y d_2) a los mismos individuos a los que se midió la parte leñosa y se aplicó la fórmula $Vol = \frac{4}{3} (\pi) (AT-AR) d_1 d_2$. Para los arbustos se contaron todos los retoños foliares de cinco ramas seleccionadas al azar, se obtuvo un promedio de la longitud de los retoños foliares por rama y al final se multiplicó el promedio obtenido por la cantidad de ramas totales del arbusto. Para *Sedum oxypetalum*, que tiene un crecimiento monopodial (Figura 11), se aplicó el mismo método empleado en árboles: se extrapola la biomasa de una sección de la planta a la corona completa.

Las plantas suculentas son propias del matorral xerófilo, como es el caso de los nopales (*Opuntia tomentosa*), por su estructura se estimó su biomasa total a través de la suma de las biomásas de todos los cladodios que lo conforman. Suponiendo que los cladodios tienen una forma elipsoidal las variables que se obtuvieron son largo y ancho para obtener su área. El área (A) se calculó como: $A = \left(\frac{a+b}{4}\right)^2 (\pi)$, donde a es largo y b ancho del cladodio.



Figura 11. Forma de crecimiento de *Sedum oxypetalum*. Foto: D.L. Manríquez.

Para las especies que no cuentan con un modelo alométrico establecido en la literatura, como *Sedum oxypetalum* (un arbusto caducifolio) y *Agave salmiana* var. *ferox*, se propuso una ecuación alométrica que predice biomasa área. En el caso de *S. oxypetalum*, la ecuación se realizó tal como propone Cano-Santana (1994), en temporada de secas se cortaron y defoliaron desde su base seis individuos de distintos tamaños y se midió el diámetro del tallo a los 10 cm del suelo. Los tejidos fueron secados a temperatura constante de 40°C y se obtuvo su ecuación de biomasa calculada a partir del diámetro del tallo a los 10 cm del suelo. Por otro lado, para calcular biomasa foliar, se midió el volumen de la copa (Vol) en la misma temporada, se cortó y secó a 40°C hasta obtener peso constante, obteniendo finalmente su ecuación, de modo que se calculó la biomasa de un retoño a partir de la longitud del mismo. El volumen de la copa se calculó como: $Vol = (d_1) (d_2) (d_3)$ donde: d_1 es largo, d_2 ancho y d_3 altura de la copa. En el caso de *Agave salmiana* var. *ferox* se eligieron aleatoriamente seis plantas de distintos tamaños. Para no sacrificar al individuo completo se eligió al azar una cuarta parte de la parte área, la cual fue cosechada y secada hasta obtener su peso seco. Para calcular la biomasa, la ecuación estará en función de la cobertura que presenta. La cobertura (Cob) se calculó como: $Cob = \left(\frac{d_1 + d_2}{4}\right)^2 (\pi)$, donde d_1 es largo y d_2 ancho de la planta, suponiendo que tienen una forma elipsoidal.

3.2.2.2. *Método de cosecha en estrato bajo.* Se cosecharon las plantas en dos cuadros de 1 × 1 m. El muestreo se realizó en temporada de lluvias, en octubre de 2016, debido a que los máximos picos de biomasa de plantas herbáceas características del Pedregal del Xitle se presentan entre agosto y octubre

(Cano-Santana, 1994). Las plantas se cortaron a ras del suelo, fueron guardadas en bolsas de papel y secadas a 40°C hasta llegar a peso seco constante.

3.2.3. *Bosque de encino*. En el PECM existen parches de vegetación de bosque de encino que varían en el nivel de apertura del dosel, para identificar el tipo de bosque (abierto o cerrado), se calculó la frecuencia de los cuadros con distintos niveles de densidad y dominancia (en términos de área basal y cobertura), para lo cual se seleccionaron aleatoriamente 30 cuadros de 100 m² (10 × 10 m) distribuidos en toda la superficie boscosa. Se registraron los siguientes datos de los árboles: diámetro de la copa (d_1), diámetro perpendicular a la copa (d_2) y PAP en temporada de secas (enero a abril de 2017). La cobertura (Cob) se calculó como: $Cob = \left(\frac{d_1 + d_2}{4}\right)^2 (\pi)$ y el área basal (AB) con la ecuación: $AB = (\pi) \left(\frac{PAP^2}{4}\right)$.

Se hizo una regresión lineal en el programa *Statística* para determinar la biomasa aérea total (de los estratos arbóreo + arbustivo + bajo) que se almacena en un cuadro de 100 m² a partir de los datos de densidad, la suma de las áreas basales y la suma de las coberturas de los árboles a partir de los datos obtenidos por Flores-Orozco y Cano-Santana (2017) para el bosque de encino del Parque Ecoguardas adyacente al PECM. Con la mejor ecuación obtenida se calculó la biomasa total aérea que almacena cada cuadro en el PECM.

Como dato adicional, se buscó una aproximación de la cantidad de carbono que podría contener la biomasa subterránea a través del coeficiente de raíz:brote² publicados en Mokany *et al.* (2006) para bosques templados de encino y matorral, cuyos valores son 0.295 y 1.837, respectivamente. El cálculo consistió en multiplicar los coeficientes raíz:brote por la cantidad de biomasa aérea de cada tipo de vegetación.

Por último, todos los valores resultantes de biomasa aérea se multiplicaron por la constante de concentración de contenido de carbono, que indica la fracción de biomasa seca que corresponde a este elemento, que tiene un intervalo de 0.45 a 0.50 del valor total de biomasa aérea (IPCC, 1996; Rojas-García, 2004). En este estudio se utilizó el valor intermedio de 0.47.

² El término raíz:brote se refiere a la posición de la biomasa respecto al suelo, "raíz" denota toda la biomasa que está por debajo de la tierra y "brote" toda la biomasa que está por encima de ésta (Mokany *et al.* 2006).

4. RESULTADOS

4.1. Composición de especies

Se obtuvo para el PECM un registro total de 60 especies de plantas agrupadas en 31 familias (Apéndice 2). Para el matorral xerófilo sucesional se encontraron 29 especies de hierbas, 18 de arbustos y tres árboles: *Buddleja cordata*, *Dodonaea viscosa* y *Quercus rugosa*. Para el encinar se registran nueve especies de árboles.

4.2. Ecuaciones obtenidas

Las ecuaciones alométricas obtenidas en este estudio para calcular la biomasa aérea seca en gramos de *Agave salmiana* var. *ferox* y *Sedum oxypetalum* se presentan en el Cuadro 1. Un buen predictor de la biomasa de *A. salmiana* var. *ferox* fue un modelo lineal, mientras los mejores modelos para calcular la biomasa de tallos y hojas de *S. oxypetalum* fueron potenciales.

Cuadro 1. Modelos para determinar la biomasa seca (y , en g) de dos especies de plantas suculentas del matorral sucesional del Parque Ecoguardas, Cd. Mx. *Cob*: cobertura (en cm^2), *P10*: perímetro a los 10 cm de altura del suelo (en cm), *Vol*: volumen de la copa (en cm^3).

Especie	Ecuación	r^2	p	n
<i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i>	$y=0.3104(Cob)$	0.944	0.001	6
<i>Sedum oxypetalum</i>	Biomasa leñosa $y= 12.152(P10)^{1.9031}$	0.900	0.003	8
	Biomasa foliar $y=0.0002(Vol)^{1.0121}$	0.793	0.0003	8

La ecuación que permitió estimar con mayor precisión el número de retoños foliares (y) en *B. cordata* en función del *PAP* fue $y=0.131(PAP)+100.15$ ($r^2=0.287$, $p<0.005$, $n=22$) que es del tipo lineal. A pesar de tener un coeficiente de determinación bajo, el modelo obtenido explica de manera significativa la cantidad de retoños determinados por el perímetro del tallo. Esta ecuación ayuda a no sobreestimar retoños y por ende biomasa foliar.

4.3. Matorral xerófilo conservado

Orozco-Flores y Cano-Santana (2017) calculan que el matorral xerófilo conservado del Parque Ecoguardas almacena en promedio 9.90 ± 2.60 Mgps/ha³ y 18.19 Mgps/ha de biomasa aérea y subterránea, respectivamente. Dado lo anterior, en las 137.81 ha que ocupa este tipo de vegetación en la porción principal del PECM se estima que éste almacena 1,364 Mgps y 641 MgC de biomasa y carbono aéreo, respectivamente.

4.4. Matorral xerófilo sucesional

4.4.1. *El estrato arbóreo.* En el matorral sucesional el estrato arbóreo aportó 54.25 ± 44.15 Mgps/ha de biomasa aérea (Figura 12). De las tres especies registradas en el estrato arbóreo, *Quercus rugosa* fue la especie dominante por su aporte a la biomasa aérea (86.2%, 46.74 ± 45.02 Mgps/ha), la cual se encontró distribuida en pequeños manchones de bosque inmersos en el matorral sucesional. Otras especies dominantes fueron *Buddleja cordata* y *Dodonaea viscosa*, que aportaron 9.5 y 4.2% (5.18 ± 1.73 y 2.33 ± 2.25 Mgps/ha), respectivamente. En este estrato la mayor parte de la biomasa se concentró en la parte leñosa (66%, 35.87 ± 27.47 Mgps/ha), pues sólo el 34% restante lo aportaron los retoños foliares (17.84 ± 16.77 Mgps/ha).

4.4.2. *El estrato arbustivo.* En el matorral sucesional el estrato arbustivo aportó 7.36 ± 1.39 Mgps/ha de biomasa aérea. De las 13 especies registradas en el estrato arbustivo, *Agave salmiana* var. *ferox* fue la especie dominante por su aporte de biomasa aérea, acumuló 2.53 ± 0.79 Mgps/ha de biomasa (35%), seguido de *B. cordata* 1.41 ± 1.03 Mgps/ha (20%), *E. glabatum* 1.34 ± 1.13 Mgps/ha (19%) y *S oxypetalum* 1.08 ± 0.61 Mgps/ha (15%), son reservas considerables en comparación con las especies restantes que acumularon una cantidad menor al 5%, como *Verbesina virgata* con 0.33 ± 0.13 Mgps/ha (Figura 13).

4.4.3. *El estrato bajo.* En el estrato bajo se cosecharon 47 especies de plantas que aportaron en conjunto 1.36 ± 0.40 Mgps/ha de biomasa aérea. Tres especies fueron dominantes en la acumulación biomasa aérea dentro del matorral: *Muhlenbergia robusta* presentó el 30% de la biomasa total con 0.37 ± 0.36 Mgps/ha, *Cheilantes bonariensis* el 26% con 0.32 ± 0.16 Mgps/ha y *Cheilantes lendigera* el 15% con 0.18 ± 0.06 Mgps/ha. *Cheilantes myriophylla*, *Bidens odorata* y *Dahlia coccinea* representaron una parte

³ Megagramos de peso seco por hectárea

importante en la biomasa acumulada con el 16%. El porcentaje restante (12%) fue contribuido por 39 especies que acumularon menos de 0.03 Mgps/ha (Figura 14).

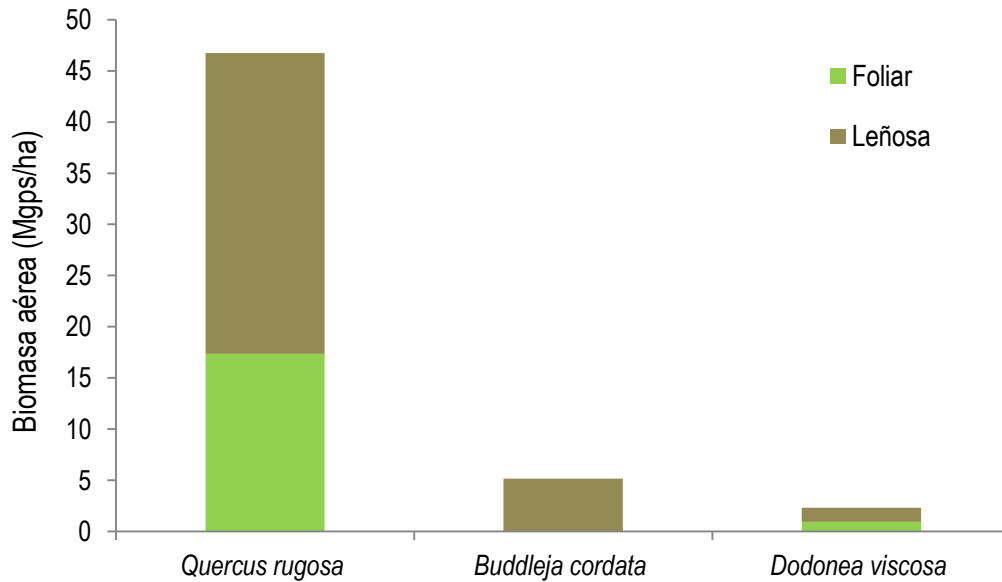


Figura 12. Aportación de cada especie a la biomasa aérea (Mgps/ha) del estrato arbóreo del matorral xerófilo sucesional en el Parque Ecológico de la Ciudad de México. Muestreo realizado en 2016-2017. Datos promedio de nueve cuadros.

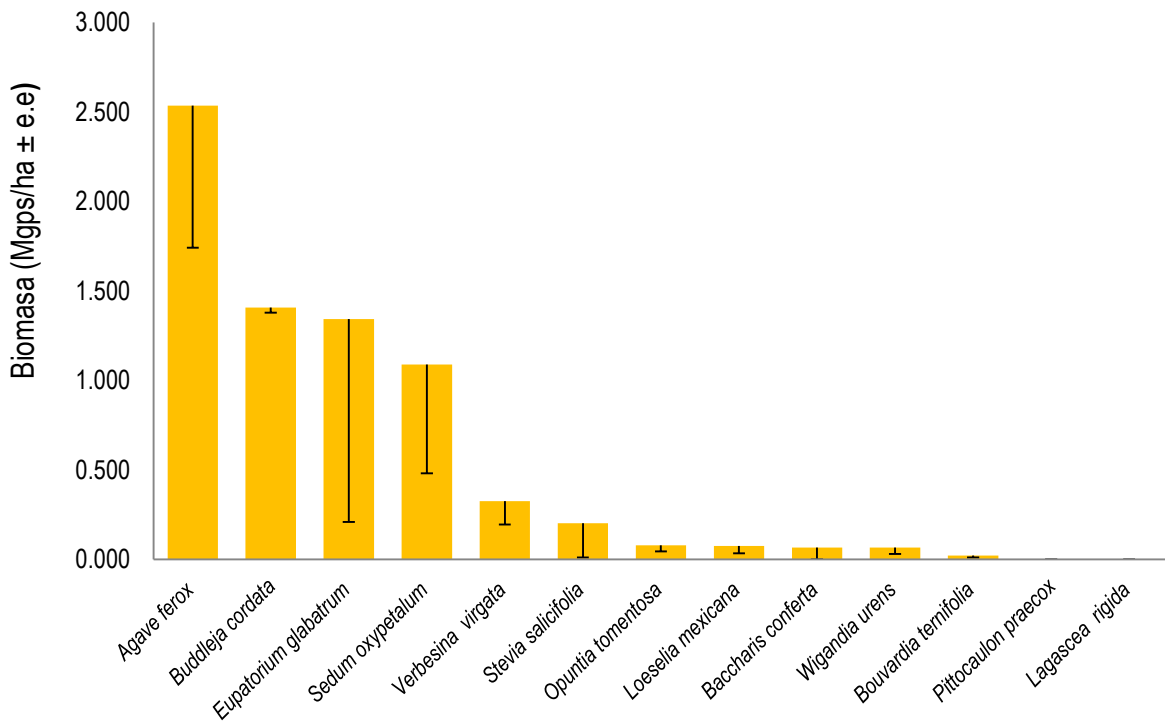


Figura 13. Aportación de cada especie a la biomasa aérea (Mgps/ha ± e.e.) del estrato arbustivo del matorral xerófilo sucesional en el Parque Ecológico de la Ciudad de México. Muestreo realizado en 2016-2017. Datos promedio de nueve cuadros.

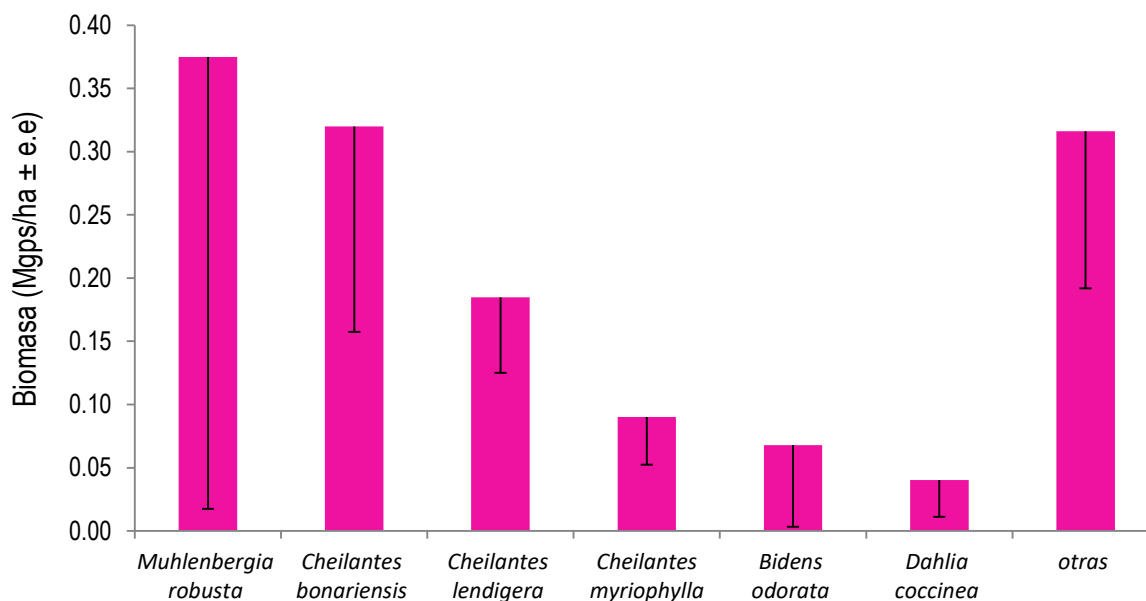


Figura 14. Aportación de biomasa aérea (Mg/ha ± e.e.) por especie del estrato bajo del matorral sucesional para el Parque Ecológico de la Ciudad de México. La barra “otras” reúne la acumulación de biomasa aérea de 39 especies de plantas que contienen menos de 0.03 Mg/ha. Muestreo realizado en 2016. Datos promedio de nueve cuadros.

4.4.4. Aportación de biomasa y carbono por estrato en el matorral xerófilo sucesional. De acuerdo con lo anterior, el matorral xerófilo sucesional almacenó 63.00 ± 43.80 Mg de biomasa seca por ha, que equivale a 26.61 ± 20.59 MgC/ha (Cuadro 2). El estrato que aporta más biomasa aérea es el arbóreo con el 54.25 ± 44.15 , le sigue el arbustivo con el 7.36 ± 1.39 , en tanto que el estrato bajo aporta sólo el 1.39 ± 0.40 . Dada la superficie que tiene este tipo de vegetación en el PECM (259.2 ha) almacena en total 16,332.56 Mgps, equivalente a 7,676 MgC.

Cuadro 2. Aportación de Mg/ha de biomasa aérea y carbono por estrato en el matorral xerófilo sucesional del PECM.

Estrato	No. de especies	Biomasa aérea (Mg/ha ± e.e.)	Carbono (MgC/ha ± e.e.)
Bajo	47	1.39 ± 0.40	0.65 ± 0.20
Arbustivo	13	7.36 ± 1.39	3.45 ± 0.63
Arbóreo	3	54.25 ± 44.15	25.49 ± 22.75
Total	50	63.00 ± 43.80	29.61 ± 20.59

4.5. El bosque de encino

4.5.1. Relación entre los rasgos del estrato arbóreo y la biomasa. De todas las variables del estrato arbóreo probadas para explicar la biomasa aérea de los demás componentes de la vegetación, se encontró que solamente el área basal de los árboles explica significativamente tanto la biomasa aérea seca total como la del estrato arbóreo, en tanto que ni la cobertura ni la densidad de árboles predicen la biomasa aérea de ningún estrato (Cuadro 3). La ecuación que estima la biomasa aérea total (W_T , en Kgps/100 m²) a partir de la suma de las áreas basales de los árboles (ΣAB , en m²/100 m²) en el bosque de encinos de la zona es: $W_T = 6094.2(\Sigma AB) + 285.1$ ($r^2 = 0.612$, $P < 0.005$, $n = 30$; Figura 15a). Por otra parte, la ecuación que predice la biomasa de árboles en un cuadro de 100 m² (W_A , en kgps/100 m²) a partir de la suma de las áreas basales de los árboles (ΣAB , en m²/100 m²) en el bosque de encinos de la zona es $W_A = 6176.4(\Sigma AB) + 190.5$ ($r^2 = 0.621$, $P < 0.02$, $n = 30$; Figura 15b).

De acuerdo con el modelo obtenido para calcular biomasa área total, el bosque de encino acumuló en promedio 629.17 ± 106.30 Mgps/ha de biomasa, lo que equivale a 295.70 ± 49.96 Mg C/ha, y dada la superficie que tiene el bosque de encinos del PECM, éste almacena 68,948 Mgps, lo que equivale a 32,406 MgC.

Cuadro 3. Resultados de las regresiones lineales entre rasgos del estrato arbóreo para predecir biomasa en pie. Los valores en negritas son significativos.

Variable independiente	Variable dependiente	r^2	P
Cobertura	Biomasa total	0.193	0.198
Área Basal	Biomasa total	0.612	0.022
Densidad	Biomasa total	0.000	0.441
Cobertura	Biomasa árboles	0.239	0.219
Área Basal	Biomasa árboles	0.621	0.020
Densidad	Biomasa árboles	0.004	0.880
Cobertura	Biomasa arbustos	0.022	0.729
Área Basal	Biomasa arbustos	0.156	0.333
Densidad	Biomasa arbustos	0.002	0.909
Cobertura	Biomasa estrato bajo	0.010	0.879
Área Basal	Biomasa estrato bajo	0.050	0.593
Densidad	Biomasa estrato bajo	0.094	0.460

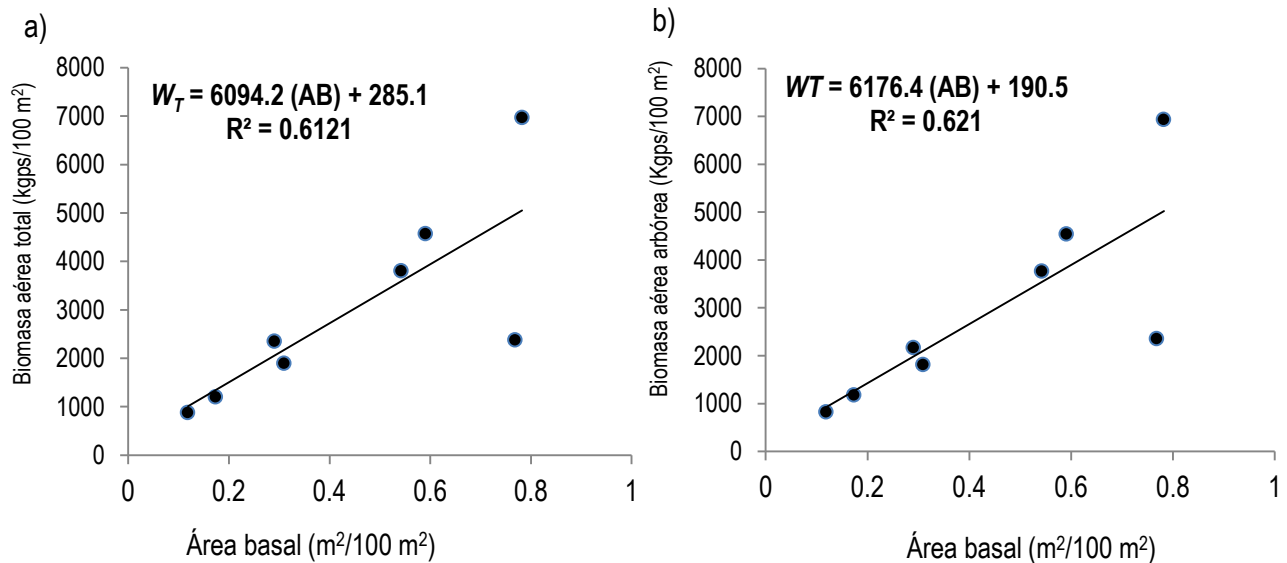


Figura 15. Relación entre el área basal (AB) de los árboles y la biomasa seca aérea total (W_T) (a) y biomasa seca área de árboles (b) en cuadros de bosque de 100 m², basado en datos de Flores-Orozco y Cano-Santana (2017) para un bosque adyacente de Parque Ecoguardas, Cd. Mx. $N = 8$. Datos de muestreos realizados en 2012.

4.5.2. *Distribución de frecuencias de los rasgos de la vegetación arbórea.* Se registró mayor frecuencia de cuadros de 100 m² con menos de 15 individuos, luego, baja bruscamente la frecuencia de cuadros con más de 16 árboles (Figura 16). En los datos de frecuencia de cuadros con distinta área basal (m²/100 m²) vemos el mismo comportamiento, hay 18 cuadros con menos de 4 m²/100 m² de área basal y 12 cuadros que tienen de 5 a 9 m²/100 m² (Figura 17). Por último, se observa que la mayoría de los cuadros contienen menos de 400 m²/100 m² de cobertura foliar y solamente dos cuadros tuvieron más de 550 m²/100 m² (Figura 18). De manera general, los datos de densidad y área basal muestran dos modas, que parece corresponder a un bosque abierto y otro cerrado.

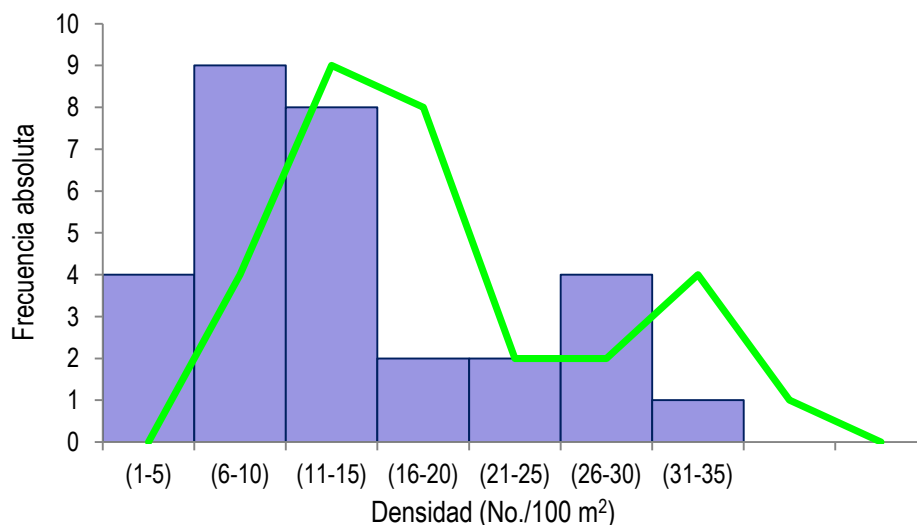


Figura 16. Distribución de frecuencias de los datos de densidad de árboles en cuadros de 100 m² en los bosques de encino del Parque Ecológico de la Ciudad de México. $N = 30$ cuadros.

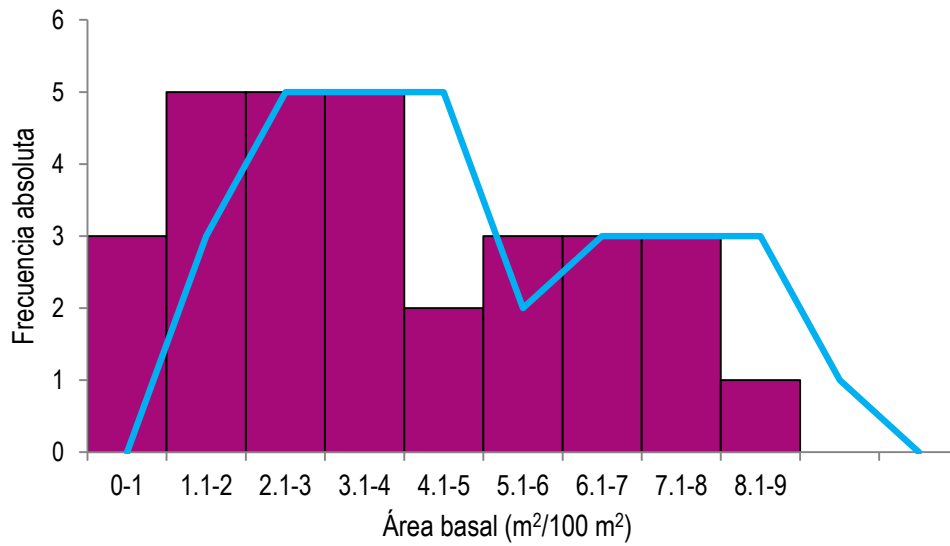


Figura 17. Distribución de frecuencias de los datos de área basal de árboles en cuadros de 100 m² en los bosques de encino del Parque Ecológico de la Ciudad de México. *N* = 30 cuadros.

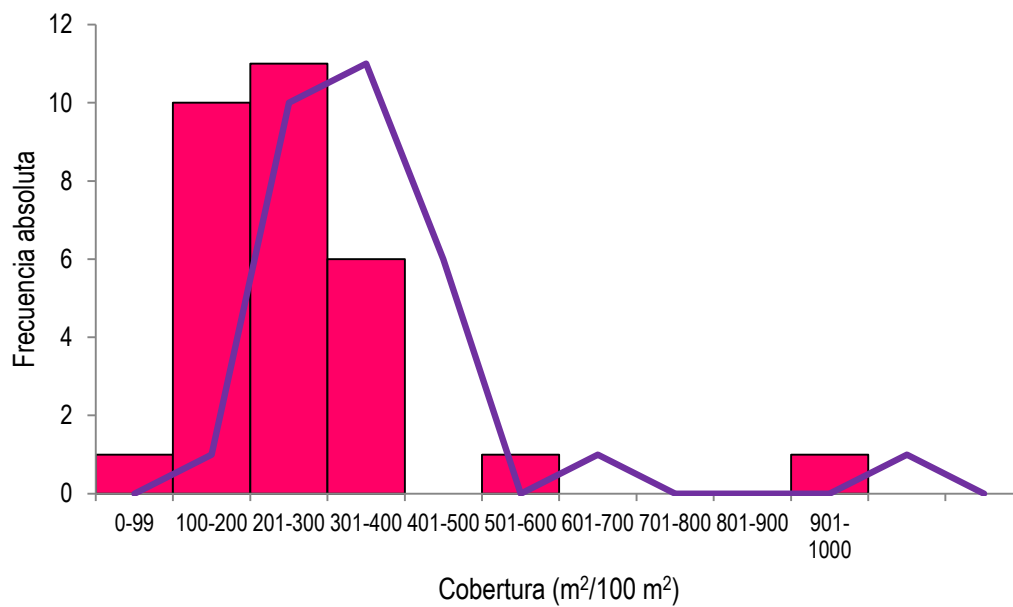


Figura 18. Distribución de frecuencias de los datos de cobertura en cuadros de 100 m² en los bosques de encino del Parque Ecológico de la Ciudad de México. *N* = 30 cuadros.

4.6. Área cubierta por cada tipo de vegetación

La porción principal del PECM tiene un área de 506.64 ha, de las cuales 259.23 ha es matorral xerófilo en proceso de sucesión, 137.81 ha es matorral xerófilo conservado y 109.60 ha bosque de encino (Cuadro 4).

Cuadro 4. Áreas calculadas para cada tipo de vegetación en el PECM.

Tipo de vegetación	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque de encino	109.60	21.63
Matorral xerófilo sucesional	259.23	51.17
Matorral xerófilo conservado	137.81	27.20
Total	506.64	100

4.7. Almacén aéreo de biomasa y carbono en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

La porción principal del PECM almacena 86,644 Mgps de biomasa aérea, lo que corresponde a 40,723 MgC (Cuadro 5). El bosque de encino es el tipo de vegetación que almacenó mayor cantidad de biomasa y carbono en sus tejidos aéreos (79.6%). Le sigue en importancia el matorral xerófilo sucesional, con el 18.8%, por último se encuentra el matorral conservado que almacena el 1.6%.

Cuadro 5. Almacenes de biomasa aérea (Mgps) y carbono (MgC) en cada tipo de vegetación de la porción principal del Parque Ecológico de la Ciudad de México.

Tipo de vegetación	Biomasa (Mgps/ha ± e.e.)	Carbono (Mg/ha ± e.e.)	Área (ha)	Almacén de biomasa (Mgps)	Almacén de C (MgC)
Bosque de encino	629.17 ± 106.30	295.70 ± 49.96	109.60	68,948	32,406
Matorral xerófilo sucesional	63.00 ± 43.80	29.61 ± 20.59	259.23	16,332	7,676
Matorral xerófilo conservado	9.90 ± 2.60	4.70 ± 1.20	137.81	1,364	641
Total	-	-	506.64	86,644	40,723

4.8. Almacén total (aérea y subterránea) de biomasa y carbono

El cálculo indirecto de biomasa subterránea aumenta los valores de biomasa total para el PECM con un total de 139,510 Mg de biomasa seca y 65,569 MgC (Cuadro 6).

Cuadro 6. Almacenes de biomasa total (Mgps) y carbono (MgC) en cada tipo de vegetación de la porción principal del Parque Ecológico de la Ciudad de México.

Tipo de vegetación	Biomasa aérea (Mgps/ha ± e.e.)	Biomasa subterránea/ha	Biomasa total (Mgps/ha)	Área (ha)	Almacén de biomasa (Mgps)	Almacén de C (MgC)
Bosque de encino	629.17 ± 106.30	185.58	814.68	109.60	89,288	41,965
Matorral xerófilo sucesional	63.00 ± 43.80	115.74	178.74	259.23	46,335	21,778
Matorral xerófilo conservado	9.90 ± 2.60	18.19	28.2	137.81	3,886	1,827
Total		329.52	1,021.63	506.64	139,510	65,569

5. DISCUSIÓN

5.1. La importancia del almacén de C en el PECM

Dado que México es el 12° emisor de GEI a nivel mundial, su gobierno en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de París en 2015 (COP21) se comprometió a alcanzar en 2030 una tasa 0% de deforestación y a reforestar y conservar sumideros de C como estrategias para su disminución (IMCO, 2016). Hasta este año, de acuerdo con el monitoreo de tala a nivel nacional, se reportó una disminución en la tasa promedio anual de deforestación del 51%, puesto que del año 1990 a 2000 había una tasa promedio de 190 mil 400 ha/año y pasó a 91 mil 600 ha/año de 2010 a 2015 (FAO, 2015). Sin embargo, inmediatamente después, en 2017, aumentó la deforestación 300%, es decir, a 299 mil ha de bosque (GFW, 2018). Continuar con esta tasa de deforestación minimiza los esfuerzos de reforestación, que se pretende sea de 1 millón ha en 2018, cantidad comprometida por el gobierno mexicano (CONAFOR, 2018).

Para cumplir con estos compromisos nacionales es crucial la participación de la población y gobierno de la Cd. Mx., ya que ciudades globales⁴ como ésta son responsables del 70-75% de las emisiones mundiales de GEI a la atmósfera (SEDEMA, 2016a). En el último inventario de emisiones de estos gases en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) de 2014 se reportó la emisión de 56.2 millones Mg CO₂eq, de las cuales 37% fueron emitidas por la Cd. Mx. (esto es, 20.7 millones Mg CO₂eq) y el 63% restante por el Estado de México (SEDEMA, 2016a). De esta cantidad de CO₂eq el 68% lo aporta el CO₂, el cual es emitido principalmente por el transporte (61%) y por el sector industrial (21%) (SEDEMA, 2016a).

Adicionalmente, en el norte de la Cd. Mx. se libera mayor cantidad de CO₂eq que en el sur (Figura 19) (SEDEMA, 2016a). Las zonas con bajas emisiones de CO₂eq coinciden con la posición geográfica de las áreas naturales protegidas y las zonas de vegetación de la entidad, misma región que registra la mayor cantidad de toneladas de carbono capturadas por la vegetación (Figuras 20a y b). Esto es un indicador claro de que es crucial conservar sumideros de carbono para mantener el aire más limpio en la Ciudad.

⁴ Ciudad global, mundial o central es aquella que tiene rasgos emanados de la globalización y que mantiene un sostenido crecimiento urbano y, a la vez, tiene una influencia mundial en términos culturales, económicos y políticos (Cañas y Cárdenas, 2013).

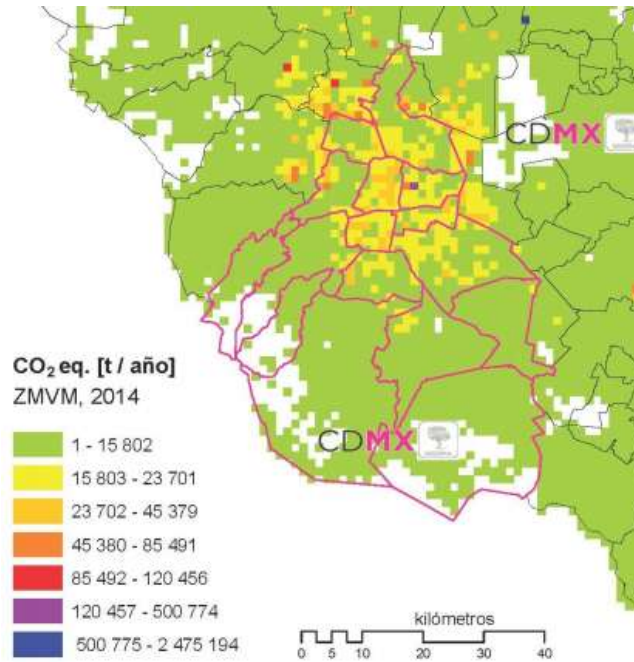


Figura 19. Distribución espacial de la emisión de CO₂eq/año en la Zona Metropolitana del Valle de México. Ciudad de México delimitado en color rosa (SEDEMA, 2016a).

a)

b)

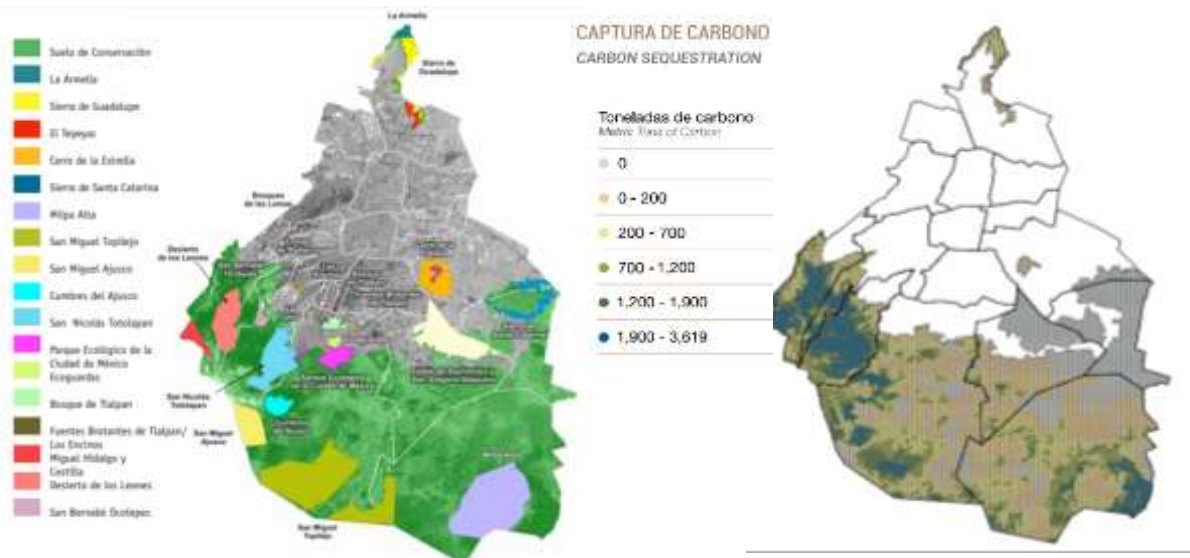


Figura 20. Distribución espacial de (a) las Áreas Naturales Protegidas (SEDEMA, 2018) y (b) de las cantidades de carbono capturadas por la vegetación en la Ciudad de México (SEDEMA, 2016).

La SEDEMA (2016b) indica que los grandes sumideros de carbono se asocian a los bosques densos, y bajo este criterio menciona al Ajusco como zona importante de almacenamiento de carbono. En este estudio se identifica una cantidad de 65,569 Mg de carbono total de los cuales 40,723 MgC está secuestrado en la parte área en las 506 ha que pertenecen al Parque Ecológico de la Ciudad de México del Ajusco medio. La conservación de las Áreas Naturales Protegidas en la Ciudad de México es clave para garantizar la sustentabilidad y desarrollo de los capitalinos, cuya importancia radica en los servicios ecosistémicos que proveen a quienes habitamos en la capital. Entre los servicios que presta el PECM, además de la captura de carbono, están:

1. Suministro de agua. Por tener el suelo muy permeable, la roca basáltica muy fracturada y la precipitación pluvial de 1,200 mm anuales el PECM contribuye al mantenimiento y mejora de la calidad del agua, la infiltración y percolación en el suelo y el mantenimiento de los hábitats acuáticos (SEDEMA, 2016b; GOCM, 2016).
2. Regulación del clima. Los árboles del bosque de encino del PECM son capaces de absorber grandes cantidades de radiación por lo la temperaturas máximas quedan disminuidas y las mínimas aumentan, asimismo, la humedad relativa es ligeramente mayor (SEDEMA, 2016b); además, la orografía favorece la entrada y el ascenso de masa de aire del norte y noreste, con la consecuente buena aireación (GOCM, 2016).
3. Retención de suelo. La vegetación evita procesos de erosión por agua o viento. Retiene el suelo, por lo que evita el movimiento y acumulación de sedimentos en las zonas más bajas de las microcuencas con las consecuentes afectaciones negativas a la infraestructura urbana; por otro lado, evita que el suelo sea transportado por el viento en forma de partículas suspendidas, disminuyendo la contaminación atmosférica y daños a la salud humana (SEDEMA, 2016b).
4. Biodiversidad. El PECM es uno de los sitios de la Ciudad de México que alberga una gran riqueza biológica, especialmente de plantas, ya que se cuenta con diferentes tipos de vegetación como: matorral xerófilo, encinar, matorral xerófilo–bosque de *Quercus*, bosque de *Quercus–Pinus*, de igual manera se presenta una gran diversidad de fauna (138 especies vertebrados), entre los que destacan las aves (39%), mamíferos (31%), reptiles (20%) y anfibios (10%) (GOCM, 2016).
5. Servicios culturales: Dos de los motivos por los que el PECM se nombró ANP fue contar con espacios recreativos que formen una educación ambiental en los ciudadanos para que participen y promuevan

su conservación; así como brindar espacios abiertos a la investigación para promover la generación de conocimiento científico para un mejor manejo y cuidado del PECM (GOCM, 2016).

5.2. El matorral xerófilo conservado

El matorral xerófilo conservado del PECM, al igual que el Parque Ecoguardas (Orozco-Flores y Cano-Santana, 2017), almacena 9.9 Mgps/ha de biomasa aérea, un valor menor al obtenido en el matorral xerófilo del Bosque de Tlalpan (21.5 Mgps/ha; Santiago-Romero y Rojas-García, 2013), área localizada a ~8 km al norte del PECM y que forma parte del Pedregal del Xitle. Asimismo, este dato es cercano a lo reportado para un chaparral (12.3 Mgps/ha) y un matorral xerófilo (14.2 Mgps/ha) en el sureste del país (Cairns *et al.*, 2000), y se encuentra dentro del intervalo registrado en las zonas áridas del desierto de Sonora (6.7-23.8 Mgps/ha; Búrquez y Martínez-Yrizar, 2011). Sin embargo, su valor está por debajo del intervalo reportado por Becerril-Piña *et al.* (2014) en las zonas semiáridas de Dolores Hidalgo, Guanajuato (20.5-42.2 Mgps/ha) y para un matorral espinoso en Nuevo León (44.4 Mgps/ha; Návar *et al.*, 2001). De manera general, tenemos valores reportados en sistemas áridos de México que van de 6.7 a 44.4 Mgps/ha (Cuadro 7), y lo calculado por Orozco-Flores y Cano-Santana (2017) se encuentra dentro de dicho intervalo.

Cuadro 7. Datos de biomasa aérea registrada en matorrales xerófilos de México.

Localidad	Biomasa aérea (Mgps/ha)	Referencia
Desierto de Sonora	6.7-23.8	Búrquez y Martínez-Yrizar (2011)
Matorral xerófilo en el Parque Ecoguardas, Cd. Mx.	9.9 ¹	Orozco-Flores y Cano-Santana (2017); L.A. Orozco-Flores (en prep.).
Bosque espinoso en el noroeste de México	11.4	Návar <i>et al.</i> (2008)
Chaparral en el suroeste de México	12.3	Cairns <i>et al.</i> (2000)
Matorral xerófilo en el suroeste de México	14.2	Cairns <i>et al.</i> (2000)
Zonas semiáridas de Dolores Hidalgo, Gto.	20.5-42.2	Becerril-Piña <i>et al.</i> (2014)
Matorral xerófilo en el Bosque de Tlalpan, Cd. Mx.	21.5	Santiago-Romero y Rojas-García (2013)
Matorral espinoso de Nuevo León	44.4	Návar <i>et al.</i> (2001)
Matorral sucesional en el Parque Ecológico de la Ciudad de México, Cd. Mx.	63.0	Este estudio

¹Dato utilizado en este estudio para el PECM.

5.3. El matorral xerófilo sucesional

La biomasa área registrada en el matorral xerófilo sucesional del PECM (63.00 ± 43.79 Mgps/ha) fue más alta que el rango reportado en otros matorrales xerófilos de México. Esto se debe a que antes de la perturbación existió un bosque de encino abierto envuelto en una matriz de matorral xerófilo que fue modificado con distintos niveles de disturbio que resultó en un matorral xerófilo sucesional secundario con encinares aislados (Mendoza-Hernández *et al.*, 2013). Es muy probable que estos parches de encinos correspondan a relictos de lo que hubo antes de los asentamientos urbanos ilegales, árboles que hoy en día aportan una mayor cantidad de biomasa y carbono al matorral xerófilo sucesional. Asimismo, estos parches de encino son jóvenes en comparación con los árboles del bosque maduro de las zonas altas del PECM. Éstos encinares jóvenes tienen una alta tasa de crecimiento, lo que conlleva necesariamente a un aumento de fitomasa en sus tejidos (Villar *et al.*, 2014), por lo que se convierten en importantes entidades de secuestro de carbono (Avilés, 1995; Tipper, 1998). No obstante, se sabe que la incorporación de biomasa área depende también de los factores ambientales a lo que se enfrentan los árboles, por ejemplo, la disponibilidad de agua y de nutrientes del suelo (Loescher *et al.*, 2002).

Por otro lado, de todas las especies presentes en el matorral xerófilo sucesional, *Q. rugosa* es la especie que más contribuye a la biomasa aérea, pues de las plantas del estrato arbóreo, este encino almacena el 86% (47 Mgps/ha), en tanto que *B. cordata* almacena el 9% (5 Mgps/ha) y *D. viscosa* el 4% (2 Mgps/ha). L.A. Orozco-Flores (en prep.) obtuvo resultados similares para el matorral xerófilo en el Parque Ecoguardas en el cual *Quercus castanea* es la especie que acumula mayor cantidad de biomasa aérea (26.3 Mgps/ha), seguido de *B. cordata* (2.9 Mgps/ha), lo que implica que juntos aportan el 99.9% de la biomasa aérea total en el matorral xerófilo. En zonas más bajas dentro de los Pedregales de Ciudad Universitaria donde hay baja frecuencia de encinos, Cano-Santana (1994) encontró que *B. cordata* es la especie dominante respecto a su aporte a la productividad primaria neta aérea en términos de biomasa.

5.4. Rasgos de los estratos del matorral xerófilo sucesional

5.4.1. *Estrato bajo.* El estrato bajo del matorral xerófilo sucesional almacena 1.39 Mgps/ha de biomasa aérea. *Muhlenbergia robusta*, conocida como zacatón o pasto escobilla (CONABIO 2018), es la especie de mayor contribución a la biomasa aérea (0.37 Mgps/ha) con 30%. Este pasto amacollado es abundante y altamente productivo en zonas de matorral (Penton-Fernández, 2000). Se reporta como la especie más importante respecto a su aporte a la productividad primaria neta aérea en términos de biomasa área del

estrato herbáceo en la REPSA, localizada a ~12 km al norte del PECM (101.9 g m² año⁻¹; Cano-Santana, 1994), también lo es en el matorral xerófilo conservado del Parque Ecoguardas (L.A. Orozco-Flores, en prep.) por su aporte a la biomasa aérea del estrato bajo (14.7 Mgps/ha).

Otras dos especies dominantes son los helechos *Cheilantes bonariensis* y *C. lendigera*. Los helechos, en general, son consideradas especies pioneras debido a que son abundantes en las primeras etapas de sucesión ecológica (Valverde *et al.*, 2005). La alta contribución de estas dos pteridofitas a la biomasa se debe a que se desarrollan comúnmente en los matorrales xerófilos, crecen sobre rocas expuestas y tienen resistencia a la desecación a pesar de estar expuestas a altos niveles de radiación (Vibrans, 2011). En la REPSA se reporta que los helechos en temporada de lluvias de junio a noviembre tienen picos máximos de aumento de biomasa aérea (Cano-Santana, 1994).

5.4.2. *Estrato arbustivo*. El estrato arbustivo del matorral xerófilo sucesional almacena 7.36 Mgps/ha de biomasa aérea distribuido en 13 especies. La mayor cantidad se concentra en sólo cuatro especies: *Agave salmiana* var. *ferox* que almacena 2.56 Mgps/ha (34.6%), *Buddleja cordata* con 1.41 Mgps/ha (19%), *Eupatorium glabatum* 1.34 Mgps/ha (18.1%) y *Sedum oxypetalum* 1.09 Mgps/ha (14.7%), las cuales en conjunto acumulan el 86.4% de la biomasa total del estrato arbustivo, el resto acumula menos de 1 Mgps/ha. Del mismo modo, Vásquez y Henry (2012) reportan que la mayoría de la biomasa aérea de 12 bosques tropicales de Colombia se concentra en pocas especies, pues cinco especies almacenaron entre 50 y 80% de la biomasa aérea y del carbono. Otros resultados semejantes son los obtenidos por Kirby y Potvin (2007) en bosques y sistemas agroforestales en Panamá, cuyo almacén de biomasa se distribuye en más de 100 especies, pero sólo 12 son importantes.

Agave salmiana var. *ferox* es una especie importante en la aportación de biomasa por su alta abundancia en el estrato arbustivo (apéndice 3). Por otro lado, su mayor aportación se debe, además de a su abundancia, a sus hojas numerosas y altamente fibrosas que poseen grandes cantidades de compuestos de carbono (celulosa, lignina y hemicelulosa) (García-Mendoza, 2007; Quintana-Vega 2012).

5.4.3. *Estrato arbóreo*. En el estrato arbóreo del matorral xerófilo sucesional la mayor porción de biomasa aérea se almacena en tejidos leñosos, en particular para la especie dominante, *Q. rugosa*, se concentra 63% de biomasa en el leño y 37% en las hojas. Ruiz-Aquino *et al.* (2014) en Oaxaca, reportaron para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* 82.9 y 82.3% de biomasa leñosa, respectivamente. Gómez *et al.* (2011), por su parte, reportaron en promedio 62.5% de biomasa para tallo, 27.8% para las ramas y 9.6% para

follaje en *Quercus magnoliaefolia*. En un estudio en Chignahuapan, Puebla, Castellanos *et al.* (1996) encontraron que 72% de la biomasa se concentra en los fustes de *Pinus patula*. Por su parte en Tlaxcala para *Abies religiosa* se encontró 84.5% de la biomasa total en el fuste y 8.6% en follaje (Avendaño *et al.* 2009). Estos datos muestran que en la parte leñosa de los árboles hay una gran acumulación de biomasa; Santa Regina (2000) indica que la biomasa tiende a acumularse en los tallos conforme crece el árbol debido a que a cierta edad el crecimiento en diámetro de los troncos es prioritario y la competencia por luz pasa a segundo término, por su parte, Ryan *et al.* 1997 menciona que el incremento de biomasa se acumula mayormente en los tallos porque son indispensables como soporte y regulación en el transporte de nutrientes que pasan desde las raíces a la copa de los árboles.

La cantidad de biomasa acumulada en los distintos órganos que conforman estructuralmente a un árbol puede verse afectada por factores como la edad, calidad del sitio, composición de especies, densidad de árboles, prácticas humanas y condiciones de estrés (Figueroa *et al.*, 2010), por ejemplo, en una plantación muy productiva de teca (*Tectona grandis* Linnaeus) de Nigeria se estimó que el 88% de la biomasa se distribuye en el fuste (Nwoboshi, 1983). En contraste, en una plantación poco productiva de la misma especie en la India la aportación de biomasa en el tronco fue de sólo 57% (Kaul *et al.*, 1979). En este estudio se observa que la biomasa se distribuye en altas concentraciones en el fuste, lo que quizá indicaría indirectamente que existe una buena calidad forestal y alta productividad en el ecosistema, sin embargo para corroborarlo se requiere de estudios que evalúen estos aspectos en particular.

5.5. El bosque de encino

5.5.1. Relación del estrato arbóreo y la biomasa. La radiación, humedad y temperatura son los principales factores que afectan el crecimiento de la vegetación y que son modificadas por el dosel de los árboles (Rodríguez, 2008). En los bosques, las copas de los árboles modifican las condiciones ambientales bajo el dosel, como consecuencia, hay afectación negativa en el establecimiento y la composición de especies de plantas del sotobosque (Penton-Fernández, 2000). La temperatura afecta negativamente la tasa de aparición y expansión de hojas nuevas de las especies del sotobosque, así como sobre el desarrollo de vástagos en las hierbas y, por ende, en su capacidad reproductiva (Mosquera *et al.*, 1999). En cuanto a la absorción de luz por las plantas del bosque, ésta se realiza de manera diferencial, cerca del 80% es capturada por las copas de los árboles y en el interior del bosque, de modo que al suelo llega sólo alrededor del 2% de la radiación solar, por lo que afecta negativamente la cantidad de nutrientes producidos por las hierbas y los arbustos (Fageria *et al.*, 2006). Por otro lado, la cobertura de los árboles

retiene el agua de la lluvia y la redistribuye concentrándola en las inmediaciones del tronco y en el área de la copa, reduciendo la disponibilidad de agua a toda la superficie del suelo (Rodríguez, 2008). Otro factor importante dentro de los bosques templados es el mantillo, que puede disminuir la germinación y afectar el establecimiento de plántulas (Facelli y Pickett, 1991). Estas condiciones ambientales bajo el dosel hacen de los árboles los principales acumuladores de biomasa aérea dentro de los bosques templados, en particular, la concentrada en los troncos. Por tal razón, es posible estimar la cantidad de biomasa aérea total de grandes regiones a través de los árboles a través de ecuaciones alométricas, tal y como se obtuvo en este estudio.

Las ecuaciones alométricas se aplican a los datos de inventario forestal para calcular la biomasa y las reservas de carbono de los bosques (Vashum y Jayakumar, 2012). Asimismo, se han usado para calcular la biomasa que almacenan bosques tropicales secos de la India (Mani y Parthasarathy, 2007), bosques templados de los Apalaches (Virginia, Estados Unidos; Stuart *et al.*, 1980; Baumgras, 1984; Wiant *et al.*, 1984), bosques templados de Tlaxcala, México (Acosta-Mireles *et al.*, 2009), bosques de Campeche (De Jong, 2012) y bosques de Jalisco (Balderas y Lovett, 2012). El presente estudio y los estudios mencionados demuestran que el área basal de los árboles es directamente proporcional a la cantidad de biomasa aérea. Chiba (1998) en su análisis arquitectónico de la relación entre área basal y biomasa aérea de los árboles indica que su estrecha correlación podría estar asociada con el desarrollo de la arquitectura del árbol, puesto que la parte basal del tronco contiene el proceso de crecimiento desde su inicio.

El modelo alométrico de este estudio tiene un valor bajo de coeficiente de determinación ($r^2 = 0.612$), lo que se debe al bajo número de parcelas consideradas para realizar la ecuación ($n = 8$), pues no contempla en su totalidad la variabilidad del bosque. A pesar de ello, el modelo es bastante útil, puesto que da información de la biomasa aérea del encinar a través de la medición del área basal de los árboles de forma rápida, sencilla y económica.

5.5.2. Biomasa aérea almacenada. El bosque de encino es el tipo de vegetación que más biomasa aérea almacena en el PECM: 629.17 ± 1.06 Mgps/ha, que corresponde a 295.70 ± 0.49 Mg C/ha, 9.9 veces más que el matorral xerófilo sucesional (63 ± 43.80) y 63 veces más que el matorral xerófilo conservado (9.9 ± 2.6). Estos valores están por encima de los reportados en la literatura (Cuadro 8). Los valores de biomasa aérea y carbono están por encima de lo registrado para el área natural Parque Ecoguardas, Cd. Mx. (347.9 Mgps/ha y 163.5 Mg C/ha) (Orozco-Flores y Cano-Santana, 2017), La Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas (219.3 Mgps/ha y 110 MgC) (Rodríguez-Laguna, 2009), el Parque Nacional El Chico, Hidalgo

(179 Mgps/ha y 106 Mg C/ha) (Rodríguez, 2013) y para bosques altos andinos, Antioquia, Colombia (230 Mgps/ha) (Aguas, 2016), lo cuales también son bosques compuestos por encinos. Por otro lado, los valores del PECM son similares a los del bosque tropical de la Reserva Bubu en Perak, Malasia (501.74 Mgps/ha y 225.55 Mg C/ha; Majid, 2015) y los bosques templados del Himalaya, India (donde se reporta 593, 566 y 505 Mgps/ha en bosque de roble, abeto y castaño, respectivamente; Adhikari *et al.* 1995), sin embargo los valores de carbono del PECM están por debajo de lo calculado para los bosques templados de la Precordillera de los Andes en Chile (622.06 Mg C/ha) y en la Cordillera de la Costa (423.86 Mg C/ha) (Schlegel, 2001, en ambos casos). A grandes rasgos, se observa que existe una gran variación en la acumulación de biomasa aérea y carbono en los bosques.

Cuadro 8. Datos de biomasa aérea y carbón por hectárea registrados en bosques del mundo.

Localidad	Tipo de vegetación	Biomasa aérea (Mgps/ha)	Carbón aéreo (MgC/ha)	Referencia
Parque Nacional El Chico, Hidalgo	Bosque de encino	179	106	Rodríguez, 2013
La Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas	Bosque de encino	219.3	110	Rodríguez-Laguna, 2009
Antioquia, Colombia	Bosques de encino altos andinos	230	ND*	Aguas, 2016
Parque Ecoguardas, Cd. Mx.	Bosque de encino	347.9	163.5	Orozco-Flores y Cano-Santana, 2017
Reserva Bubu en Perak, Malasia	Bosque tropical	501.74	225.55	Majid, 2015
Himalaya e India	Bosques templados (roble, abeto y castaño)	593, 566 y 505	ND	Adhikari <i>et al.</i> , 1995
Parque Ecológico de la Ciudad de México	Bosque de encino	629.17	295.70	Este estudio
Cordillera de la Costa en Chile	Bosques templados	ND	423.86	Schlegel, 2001
Precordillera de los Andes en Chile	Bosques templados	ND	622.06	Schlegel, 2001

*ND: No existe dato

5.6 Factores que afectan el almacén de biomasa y secuestro de carbono en el PECM

Los valores de biomasa y de captura de carbono del bosque de encino y matorral xerófilo del PECM se encuentran dentro de un amplio intervalo de valores reportados en la literatura para este tipo de ecosistemas (Cuadros 7 y 8). Esta gran variación de datos se debe a que las comunidades vegetales están interconectadas en redes de interacciones complejas de factores bióticos y abióticos que influyen en los procesos de secuestro de carbono y producción de biomasa (Chapin *et al.*, 2000), lo que les confiere distinta capacidad para actuar como sumideros de carbono. Los factores que limitan o intensifican los almacenes de biomasa de las plantas en los ecosistemas terrestres son los mismos que afectan la productividad primaria neta (PPN), ya que denota la tasa a la que los organismos fotosintetizadores incorporan nueva biomasa por unidad de área (Begon *et al.*, 2006).

En el proceso de PPN se requiere suministro de energía solar, por lo que la biomasa se ve afectada negativamente por los gradientes latitudinales. Por ejemplo, se registra esta tendencia en la productividad primaria bruta (materia incorporada en tejidos + materia liberada por respiración) al pasar de zonas tropicales a boreales a nivel planetario (Falge *et al.*, 2002; ver Cuadro 9). Esta tendencia de latitud indica que la radiación solar y la temperatura pueden limitar la productividad de las comunidades vegetales, sin embargo, existen otros factores que frecuentemente condicionan la PPN a escalas menores (Begon *et al.*, 2006).

Cuadro 9. Productividad primaria bruta de bosques en distintas latitudes de Europa y América del Norte y del Sur, estimadas como la suma de la productividad neta del ecosistema y la respiración del ecosistema. Calculado a partir de flujos de CO₂ medidos en las copas de los bosques (Falge *et al.*, 2002.)

Tipo de bosque	Estimación de PPB (g C m⁻² año⁻¹)	Media de estimaciones
Bosque tropical	3249	3249
Bosque caducifolio templado	1122-1507	1327
Bosque de coníferas templado	992-1924	1499
Bosque caducifolio frío	903-1165	1034
Bosque boreales	723-1691	1019

A escalas menores, la gran variabilidad en la producción de biomasa dentro los ecosistemas muestra que existen otras variables que afectan este proceso, ya que se observa que la producción de biomasa aérea varía durante el año a causa de la temporalidad estacional (Knapp y Smith, 2001). La amplitud de este cambio depende del tipo de vegetación; por ejemplo, en zonas de bosques caducifolios hay un cambio notable en la producción de biomasa debido a que durante la caída de hojas no hay

secuestro de carbono por parte de éstas; en contraste, los bosques perennifolios presentan fluctuaciones menores de productividad primaria durante el año (Begon *et al.*, 2006). Estos datos indican que la cantidad de carbono también depende de la fenología de las especies de plantas y de las condiciones ambientales que varían en cada estación del año.

Por otro lado, también existen cambios en la PPN conforme avanza la edad sucesional del ecosistema. En ecosistemas sucesionales tempranos la PPN es más alta y, por el contrario, las especies que llegan a dominar en sucesiones tardías acumulan biomasa más lentamente (Nowak *et al.*, 2002). Así mismo, la captura de carbono y la biomasa almacenada en un ecosistema depende de las especies vegetales que lo conformen, ya que la especie que tenga el mayor periodo de vida condiciona el momento en que disminuye la producción de biomasa; por ejemplo, en un bosque de coníferas subalpinas, *Pinus albicaulis* (de sucesión temprana) alcanza un pico de crecimiento en aproximadamente 250 años y luego disminuye, mientras que *Abies lasiocarpa* continúa con la captura de carbono hasta los 400 años (Begon *et al.*, 2006). Por todo lo anterior, se espera que el almacén de biomasa y de C cambien conforme avance la edad sucesional.

Por otra parte, la cantidad de recursos disponibles, como el CO₂ y el agua, son factores importantes en la producción de biomasa. En cuanto al CO₂, su alta disponibilidad en la atmósfera hace que las plantas sean más activas en su captura y almacenamiento (Kintisch, 2015). En lo que se refiere al agua, es un elemento esencial para la producción de biomasa que se pierde rápidamente por evapotranspiración cuando las hojas ingresan el CO₂, por tal razón, la precipitación y la evapotranspiración de un ecosistema se relaciona positivamente con la producción de biomasa de la plantas (Rodríguez-Martínez 2013; Figura 21); por ejemplo en sistemas áridos cuando hay un aumento de la precipitación y evapotranspiración la producción de biomasa es mayor (Rodríguez-Martínez, 2013). No obstante, una alta precipitación no es necesariamente equivalente a la disponibilidad de agua para las plantas ya que depende del suelo en el que esté inmersa la vegetación, por ejemplo, en suelos arenosos y de origen volcánico el agua se drena rápidamente (Begon *et al.*, 2006).

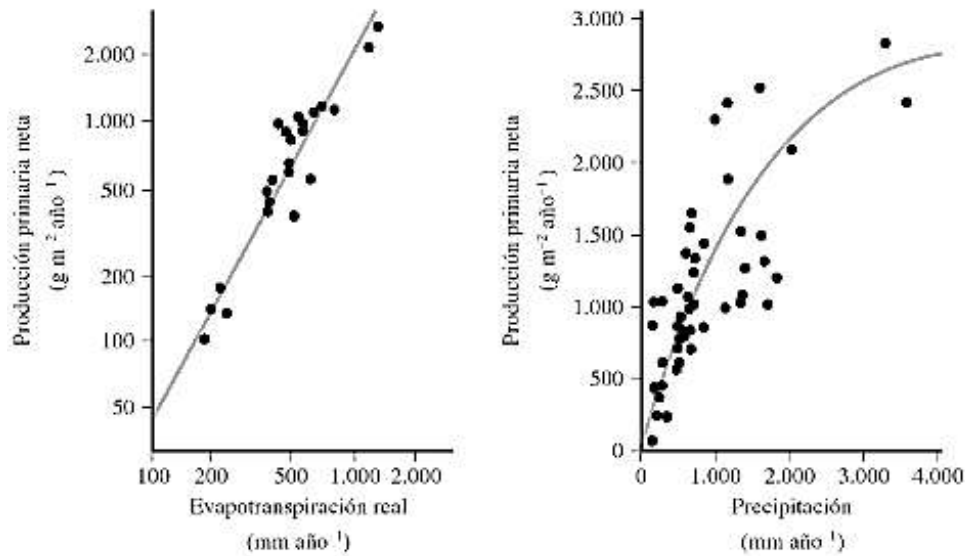


Figura 21. Relación entre la disponibilidad de agua y la producción primaria neta. En este caso el primer factor es estimado mediante la evapotranspiración total (izquierda) y la precipitación (derecha) en ambientes áridos. Fuente: Rodríguez-Martínez (2013).

De acuerdo con lo anterior, los rasgos del suelo también son importantes, en particular, la cantidad de nutrientes que éste contiene. De todos los nutrientes, los que tienen más influencia en la producción de biomasa son el nitrógeno y el fósforo (Begon *et al.*, 2006). Se reconoce que bajo condiciones de escasez de nitrógeno disminuye la eficiencia fotosintética de las plantas y, por ende, decrece su peso seco, el número de hojas y el área foliar (Ciompi *et al.*, 1996).

Lo dicho anteriormente describe algunas de las variables que se consideran las más evidentes e importantes de esta red de interacciones que tienen las plantas con los factores que afectan al ecosistema como sumidero de carbono. Sin embargo, es importante mencionar otras variables importantes como los disturbios provocados por actividades humanas que afectan la eficiencia fotosintética de las plantas y las interacciones bióticas con micorrizas y bacterias que ayudan a fijar los nutrientes en el suelo (Schlegel, 2001; Figura 22).

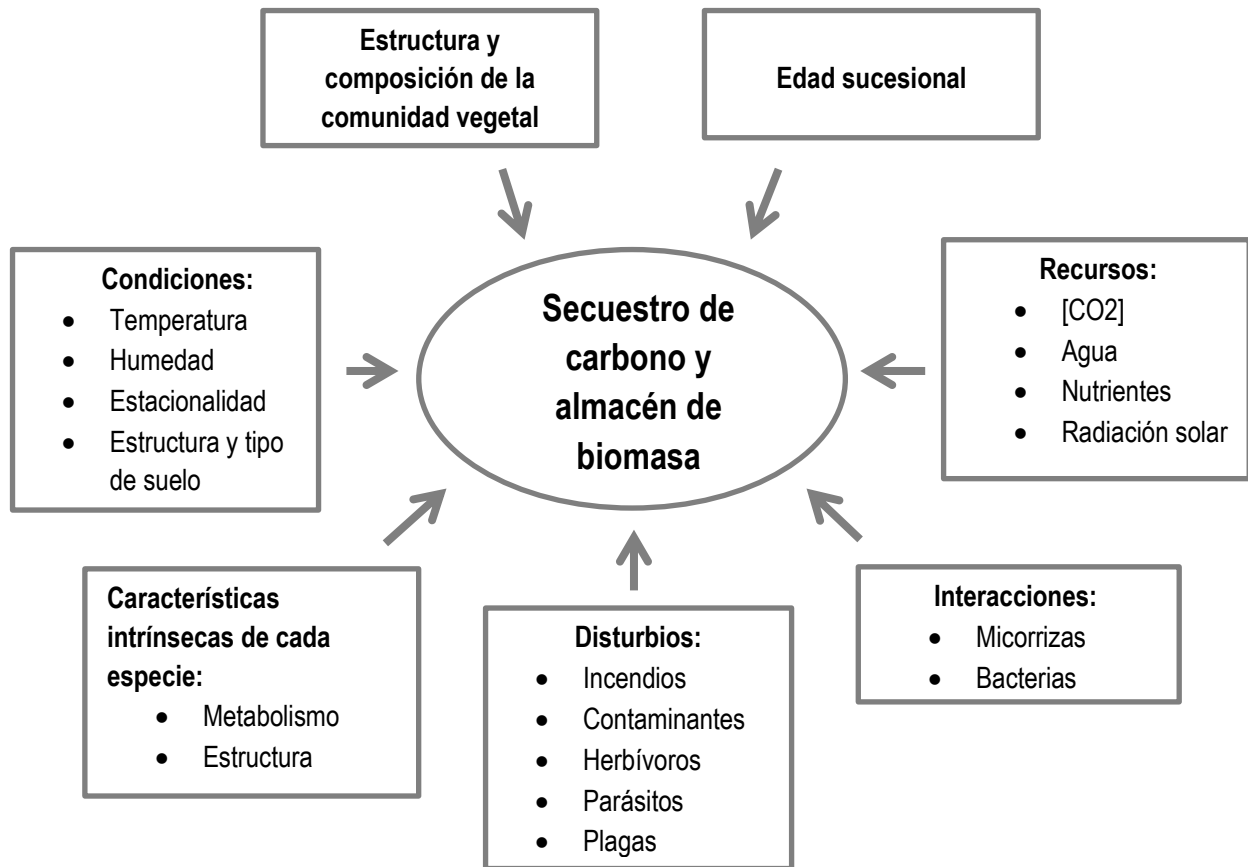


Figura 22. Factores que afectan el secuestro de carbono y el almacén de biomasa en las comunidades vegetales terrestres. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, y desde mi punto de vista, los factores que más intensifican y limitan la cantidad de biomasa y carbono que hay en el PECM son:

1. El PECM se encuentra dentro de una zona tropical, la cual tiene una alto índice de radiación solar y acceso a temperaturas altas en comparación con las zonas boreales.
2. Consta de una temporada de lluvias, de alta precipitación, de junio a octubre, que conlleva a una mayor evapotranspiración que se refleja en la temporada del año en la cual existe el máximo pico de acumulación de biomasa (Cano-Santana, 1994).
3. El PECM está en proceso de sucesión lo que conlleva a una tasa alta de captura de carbono.

4. En el PECM la mayor parte del suelo es de origen volcánico, por su naturaleza conlleva a un drenado natural y por ende un déficit de agua, además de que la roca caliente evapora rápidamente el agua de la superficie.
5. Se ha reportado que en el suelo basáltico del PECM hay escasez de nitrógeno, calcio, magnesio y potasio, pero alta disponibilidad de fósforo (Siebe *et al.*, 2016).
6. Existe alta disponibilidad de C en la atmósfera de la Ciudad de México por la emisión de combustibles fósiles (SEDEMA, 2016a).
7. Los contaminantes de la atmósfera, como el O₃ y los metales pesados de la Ciudad de México son fitotóxicos por lo altera negativamente la productividad primaria y el crecimiento de las plantas (Vitousek y Howarth, 1991).
8. La especie de árbol dominante, *Quercus rugosa*, es considerada un especie latifoliada con alto índice de área foliar, lo que implica una mayor superficie para la incidencia de radiación solar utilizada en la fotosíntesis (Begon *et al.*, 2006).

Son necesarios más estudios para poder determinar con mayor precisión por qué se dan estas diferencias en los valores del PECM respecto a otros sistemas áridos y bosques templados.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y la discusión realizada, se formulan las siguientes conclusiones:

1. El PECM representa un sumidero de carbono crucial para la Ciudad de México, pues almacena en su porción principal 86,644 Mg de biomasa seca aérea y secuestra 40,723 Mg de carbono en sus partes aéreas. Tomando en consideración los datos de proporción raíz:brote se calcula que añadiendo las partes subterráneas, esta porción del PECM podría acumular 139,510 Mgps y 65,569 MgC. Esto es muy importante dados los acuerdos que la Ciudad de México se comprometió a alcanzar en 2030 con la COP21, que es una tasa 0% de deforestación y reforestar y conservar sumideros de carbono.
2. El bosque maduro de encino almacena 629.17 ± 106.30 Mgps/ha de biomasa aérea, es el tipo de vegetación que más biomasa tiene por hectárea, pues acumula 9.9 veces más que el matorral xerófilo sucesional (63.00 ± 43.80) y 63 veces más que el matorral xerófilo conservado (9.90 ± 2.60).
3. El matorral xerófilo sucesional acumula 63.00 ± 43.80 Mgps/ha de biomasa aérea que representa 29.61 ± 20.59 MgC/ha, acumulados principalmente en el estrato arbóreo (86.1%), seguido del arbustivo con (11.7%) y por último el estrato bajo (2.2%).
4. Las especies dominantes del matorral xerófilo sucesional son *Quercus rugosa* en el estrato arbóreo, *Agave salmiana* var. *ferox* en el estrato arbustivo y *Muhlenbergia robusta* en el estrato bajo.
5. El modelo obtenido para calcular biomasa aérea total en el bosque de encino en un cuadro de 100 m² (W_A , en kgps/100 m²) a partir de la suma de las áreas basales de los árboles (ΣAB , en m²/100 m²) es $W_A = 6094.2 (\Sigma AB) + 285.1$ ($r^2=0.612$, $P<0.005$, $n = 30$).
6. Se corrobora la existencia de dos tipos de bosque de encinos en la porción principal del PECM de acuerdo al nivel de apertura: bosque abierto y cerrado.

La biomasa es un indicador fidedigno de los procesos ecológicos y de la calidad del manejo que se lleva a cabo en la vegetación, así mismo le agrega un mayor valor que ayuda a establecer un régimen especial de protección en la cual se promueva que el carbono almacenado se conserve a largo plazo, un tema actualmente muy relevante por su importante papel en la mitigación del cambio climático global, por tal motivo recomiendo lo siguiente para el Parque Ecológico de la Ciudad de México:

1. Continuar con proyectos de saneamiento que ayuden a la recuperación y disminución de las áreas de bosque afectado por descortezadores ya que se pierde cobertura vegetal productiva en el secuestro de carbono.
2. Reforestación en zonas de tala a causa de las jornadas de saneamiento.
3. Recuperación de suelo provocado por deslaves, puesto que ocasiona la erosión del mismo y pérdida de plantas pequeñas como son arbustos y herbáceas.
4. Verificar y controlar la entrada y salida de personas al PECM y mayor personal de vigilancia para evitar saqueo de especies nativas.
5. Promover proyectos de restauración ecológica en las zonas perturbadas del PECM con el fin de impulsar la aceleración de la sucesión ecológica del ecosistema, de modo que éste sea más productivo y, por ende, retenga mayor cantidad de CO₂.
6. Llevar a cabo estudios de carbono en suelos ya que aportarían un mayor valor al PECM como sumidero de carbono, pues se sabe que el suelo almacena en mayor cantidad este elemento en forma orgánica e inorgánica que la vegetación.

Finalmente, concluyo mi trabajo con gran satisfacción esperando que contribuya a evidenciar el potencial que tiene la naturaleza para reducir el nivel de concentración de carbono en la atmósfera que tanto nos perjudica. Además de guiar a la sociedad en el camino hacia cumplir los compromisos contra el calentamiento global. Por esta razón, es importante abordar más estudios que midan el papel que tienen los ecosistemas frente a esta crisis ambiental que afecta a todos los seres vivos

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., F. Carillo-Anzures y M. Díaz-Lavariaga. 2009. Determinación del carbono total en bosque mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27(2): 105-114.
- Adhikari, B.S., Y.S. Rawat y S.P. Singh. 1995. Structure and function of high altitude forests of Central Himalaya I. Dry matter dynamics. *Annals of Botany* 75(3): 237-248.
- AE, Ainsworth Energy. 2016. The carbon cycle. En: <http://ainsworthenergy.com/aboutus/environment/the-carbon-cycle/>. Última consulta: 17/abril/2016.
- Aguas-Bedolla, C.A. 2016. Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del Altiplano norte de Antioquia, utilizando teledetección. Tesis de ingeniería. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Aguilar, R.A. 2004. Geografía General. Pearson Educación, Guadalajara, Jalisco, México. 301 pp.
- Alfaro, B.J.M., L. B. Rodríguez, T.G.A. Martínez y M.G. Tijerina. 2014. Ambiente y Sustentabilidad: Por una Educación Ambiental. Grupo Editorial Patria, México, D.F., México. 235 pp.
- Andrasko, K. 1990. El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *Unasyva* 4: 3-9.
- 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. En: Wisniewski, J. y R.N. Sampson (eds.). *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Kluwer Academic Publishers, Ámsterdam, Holanda. pp. 39-53.
- Avendaño, H.D.M., A. Mireles, A. Carrillo, B. Etchevers y D. Jorge. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 2(3): 233-238.
- Avilés, B.V. 1995. Investigaciones para el tratamiento silvícola y manejo de renovables de *Nothofagas* en la zona centro de Chile. *Ciencia e investigación Forestal* 9(1): 91-102.
- Balderas, T.A. y J.C. Lovett. 2012. Using basal area to estimate aboveground carbon stocks in forests: La Primavera Biosphere's Reserve, Mexico. *Forestry* 86: 267-281.
- Baumgras, J. E. 1984. The Distribution of Biomass from Thinning in Appalachian Hardwoods by Product and Source. Northeastern Forest Experiment Station, Forest Service, Department of Agriculture, Charleston, Estados Unidos. 10 pp.
- Becerril-Piña, R., E. González-Sosa, C.A. Mastachi-Loza, C. Díaz-Delgado y N.M. Ramos-Salinas. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1(1): 9-18.

- Begon, M., C.R. Townsend y J.L. Harper. 2006. *Ecology: From Individuals to Ecosystems*, 4a. edición. Wiley-Blackwell, Oxford, Reino Unido. 754 pp.
- Bellón, M.R., O.R. Maser y G. Segura .1993. Response options for sequestering carbon in Mexican forests. Reporte F-7. Lawrence-Berkeley Laboratory, International Network on Tropical Forestry and Global Climatic, Energy and Environment Division, Environmental Protection Agency, Berkeley, California, Estados Unidos. 11 pp.
- Bonfil, S.C., I. Pisanty, A. Mendoza y J. Soberón. 1997. Investigación y restauración ecológica: El caso del Ajusco Medio. *Ciencia y Desarrollo* 135: 14-23.
- Bonfil, C., H. Rodríguez y V. Peña. 2000. Evaluación del efecto de las plantas nodrizas en el establecimiento de una plantación de *Quercus* L. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales en México* 25: 59-74.
- Brander, M. 2012. Greenhouse gases, CO₂, CO_{2e}, and Carbon: what do all these terms mean? En: <https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf>. Última consulta: 16/abril/2018.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer. FAO Forestry Paper. Department of Natural Resources and Environmental Sciences, Universidad de Illinois, Urbana, Illinois, Estados Unidos.
- Búrquez, A. y A. Martínez-Yrizar. 2011. Accuracy and bias on the estimation of aboveground biomass in the woody vegetation of the Sonora Desert. *Botany* 89:625-633.
- Cairns, M.A., P.K. Haggerty, R. Álvarez, B.H.J Jong e I. Olmsted. Tropical Mexico's recent land-use change: A region's contribution to the global carbon cycle. *Ecological Applications* 10(5): 1426-1441.
- Cano-Santana, Z. 1994. Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acrididae) y productividad primaria neta aérea en una comunidad xerófila. Tesis de doctorado. Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Cano-Santana, Z., J. Meave. 1996. Sucesión primaria en derrames volcánicos: el caso del Xitle. *Ciencias* 41: 58-68.
- Cano-Santana, Z., J.A. Meave y M.C. Arizmendi. 1999. Evaluación del potencial biológico y del estado de conservación del predio "Los Encinos", Tlalpan, Distrito Federal. Informe técnico. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Cano-Santana, Z., I. Pisanty, S. Segura, P.E. Mendoza-Hernández, R. León-Rico, J. Soberón, E. Tovar, E. Martínez-Romero, L.C. Ruíz y A. Martínez-Ballesté. 2006. Ecología, conservación, restauración y manejo de las áreas naturales y protegidas del Pedregal del Xitle. En: Oyama, K. y A. Castillo

(eds.). Manejo Conservación y Restauración de Recursos Naturales en México. Universidad Nacional Autónoma de México y Siglo XXI, México, D.F., México. pp. 203-226.

Castellanos, J., A. Velázquez, J. Vargas, C. Rodríguez y A.G. Fierros. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.

Castro, Z.R., R. Arteaga R., M. Vázquez P. y J.L. Jiménez R. 2002. Introducción a la Meteorología. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Edo. de México, México. 247 pp.

Carrillo-Trueba, C. 1995. El Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México. 177 pp.

Chiba, Y. 1998. Architectural analysis of relationship between biomass and basal area based on pipe model theory. *Ecological Modelling* 108: 219-225.

CNN, Cable News Network. 2015. Meta mexicana: reducir 25% las emisiones de efecto invernadero. En: <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2015/03/28/meta-mexicana-reducir-25-las-emisiones-de-efecto-invernadero>. Última consulta: 21/marzo/2016.

Cañas, R.J.A. y M.S.A. Cárdenas. 2013. Cuenca de México: megalópolis y biodiversidad en un hábitat en riesgo. *Veredas. Revista del Pensamiento Sociológico* 27: 123-159.

Chapin III, F.S., E.S. Zavaleta, V.T. Eviner, R.L. Naylor, P.M. Vitousek, H.L. Reynolds, D.U. Hooper, S. Lavorel, O.E. Sala, S.E. Hobbie, M.C. Mack y S. Diaz. 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405, 234–242.

Chazdon, R.L., N.E. Broadbent, M.A. Rozendaal, F. Bongers, A.M.A. Zambrano, T.A. Mitchell, P. Balvanera, J.M. Becknell, V. Boukili, H.S.P. Brancalion, D. Craven, J.S. Almeida-Cortez, A.L. Cabral, B.J. Julie, S. Denslow, D.H. Dent, S.J. DeWalt, J.M. Dupuy, S.M. Durán, M.M. Espírito-Santo, M.C. Fandino, R.G. César, J.S. Hall, J.L. Hernández-Stefanoni, C.C. Jakovac, A.B. Junqueira, S.G. Letcher, M. Lohbeck, M. Martínez-Ramos, P. Massoca, J.A. Meave, R. Mesquita, F. Mora, R. Muñoz, R. Muscarella, R.F. Yule, S.N. Ochoa-Gaona, E. Orihuela-Belmonte, M. Peña-Claros, E.A. Pérez-García, D. Piotto, J.S. Powers, J. Rodríguez-Velazquez, I.E. Romero-Pérez, J. Ruíz, J.G. Saldarriaga, A. Sanchez-Azofeifa, N.B. Schwartz, M.K. Steininger, N.G. Swenson, M. Uriarte, M.V. Breugel, H. van der Wal, M.D.M. Veloso, H. Vester, I.C.G. Vieira, T.V. Bentos, G.B. Williamson y L. Poorter. 2016. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances* 2(5): 1-10.

Ciampi, S. E. Gentili, L. Guidi y G.F. Sodatini. 1996. The effect of nitrogen deficiency on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower. *Plant Sci* 118:177-184.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2018. Banco de imágenes. En: <http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5023-Plantas/Plantas/OTV4660%20Muhlenbergia%20robusta.jpg>.info. Última consulta: 8/junio/2018.

- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2018. Reforestación 2018 con 145 millones de árboles: CONAFOR. En: <https://www.gob.mx/conafor/prensa/reforestacion-2018-se-hara-con-145-millones-de-arboles-conafor?idiom=es>. Última consulta: 2/octubre/2018.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2018. Decreto de Áreas Naturales Protegidas. En: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm. Última consulta: 2/octubre/2018.
- Dayton, L. 2016. Atmospheric carbon dioxide soars past crucial milestone. *Science* 4: 45.
- 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.
- Duhne, B. M. 2016. Aprueban en México Ley General de Cambio Climático. *¿Cómo ves? Revista de Divulgación de la Ciencia UNAM* 163: 5-7.
- ESRL, Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division. 2018. Global Greenhouse Gas Reference Network. En: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Última consulta: 16/abril/2018.
- Facelli, J., S. Pickett. 1991. Plant little: light interception and effects on an old-field plant community. *Ecology* 72(3): 1024-1031.
- Falge, E., D., Baldocchi y J. Tenhunen. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:53–74
- FAO. Food and Agriculture Organization. 2002. La evaluación del almacenamiento del carbono en el suelo y los principales cambios. En: <http://www.fao.org/docrep/005/Y2779S/y2779s06.htm#bm06>. Última consulta: 17/diciembre/2017.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 2008. El cambio climático y la producción de alimentos. En: <http://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0112s/i0112s03.pdf>. Última consulta: 08/junio/2017.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 2015. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015, Compendio de datos. En: <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>. Última consulta: 9/octubre/2018.
- Fernández, N.E. 2008. Sistemas silvopastorales establecidos con *Pinus radiata* D. Don y *Betula alba*: Productividad, biodiversidad y sumideros de carbono. Tesis de doctorado. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago, España.
- Figueroa, M.E. y S. Redondo. 2007. Los Sumideros de Carbono Naturales de CO₂, una Estrategia Sostenible entre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto desde las Perspectivas Urbana y Territorial. Muñoz Moya Editores Extremeños., Sevilla, España. 221 pp.

- Figuroa, N.C. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Posgrados campus Montecillos, Edo. de México, México.
- Figuroa, N.C., M. Ángeles, M.A. Velázquez y H.M de los Santos. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1: 147-157.
- Frank, A. 2011. El Antropoceno. ¿Podrán los humanos sobrevivir una época de los humanos? *Cultura Científica y Tecnológica* 8(44): 1-92.
- Fuchs, R.J. 1999. Introduction. En: Fuchs, R.J., E. Brennan, J. Chamie, F.C. Lo y J.I. Uitto (eds.). *Mega-City Growth and the Future*. United Nations University Press, Tokio, Japón, pp. 1-13.
- García-Mendoza, A.J. 2007. Los agaves de México. *Ciencias* 87: 14-23.
- GFW. Global Forest Watch. Tree cover loss in Mexico. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MEX>. Última consulta: 9/octubre/2018.
- GOCM, Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 2016. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Zona sujeta a Conservación Ecológica, "Parque Ecológico de la Ciudad de México". *Gaceta Oficial de la Ciudad de México* 161: 17
- GODF, Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2006. Decreto por el que se establece como Área Natural Protegida del Distrito Federal con categoría de Zona de Conservación Ecológica, el área conocida con el nombre de "Ecoguardas". *Gaceta Oficial del Distrito Federal* 141: 6-21.
- Gómez, D.J.D., B.A.I. Etchevers, R.J. Monterroso, A. Campo y J. A. Tinoco. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 261-272.
- González-Hidalgo, B., A. Orozco-Segovia y N. Diego-Pérez. 2002. Florística y afinidades fitogeográficas de la reserva Lomas del Seminario (Ajusco Medio, Distrito Federal). *Acta Botanica Hungarica* 44: 297-316.
- González V. J. 2009. Energías Renovables. Reverté, Barcelona, España. 656 pp.
- Gorte, R.W. y J.L. Ramseur. 2010. Forest carbon markets: potential and drawbacks. En: Carnell, R. (eds.). *The Role of Forest in Carbon Capture and Climate Change*. Nova Science Publishers, Nueva York, Nueva York, Estados Unidos, pp. 53-76.
- Granados-Hernández, L.A. 2015. Dinámica poblacional de *Castilleja tenuiflora* (Orobanchaceae) en un matorral con perturbación intermedia en el Parque Ecológico de la Ciudad de México, D.F., México. Tesis profesional. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.

- Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind y G. Russell. 1981. *Science* 213: 4511.
- IMCO, Instituto Mexicano para la Competitividad. 2016. México ratifica el Acuerdo de París sobre el cambio climático. En: https://imco.org.mx/medio_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/. Última consulta: 13/junio/2018.
- INEGI, Instituto Nacional de Geografía e Informática. 2017. Mapa digital de México V.6.3. En: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>. Consultado el 4 de mayo de 2017.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 1996. Guidelines for national greenhouse gas inventories. París, Francia. 337 pp.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007a. Fourth assessment report: climate change. Informe del Grupo de Trabajo I-Base de las Ciencias Físicas. En: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts-sp.pdf>. Última consulta: 08/junio/2017.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007b. Synthesis report. A Contribution of working group I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. *Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático, resumen para responsables de políticas. En: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure_es.pdf. Última consulta: 08/junio/2017.
- Kaulo, N., D.C. Sharmad, N. Tandomv y B.L. Srivastavap. 1979. Organic matter and plant nutrients in a teak (*Tectona grandis*) plantation. *Indian Forester* 105(8): 573-582
- Knapp, A.K. y M.D. Smith. 2001. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science* 291:481–484
- Kim, C., J. Jeong, R. Kim, Y. Son y K.H. Lee. 2011. Allometric equations and biomass expansion factors of Japanese red pine on the local level. *Landscape Ecology Engineering* 7: 283-289.
- Kintisch, E. 2015. Amazon rainforest ability to soak up carbon dioxide is falling. En: <http://www.sciencemag.org/news/2015/03/amazon-rainforest-ability-soak-carbon-dioxide-falling>. Última consulta: 13/junio /2018.
- Kirby, R.K. y C. Potvin. 2007. Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink Project. *Forest Ecology and Management* 246: 208-221.

- Larson, J. 1992. Estudio demográfico de *Echeveria gibbiflora* D.C. (Crassulaceae) en el Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Lindeman, R.L. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23: 399-418.
- Loescher, H.W., J.S. Powers, y S.F. Oberbauer. 2002. Spatial variation of through fall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* 18(3): 397-407.
- Lot, A., y P. Camarena. 2009. El Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México: reserva ecológica urbana de la Universidad Nacional. En: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México, pp. 19-25.
- Lot, A. y Z. Cano-Santana. 2009. Biodiversidad del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México. 538 pp.
- Lugo, A.E., S. Brown. 1992. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management* 54(1): 239-255.
- Magaña-Rueda, V.O. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, J. y F.A. Bremauntz (eds.). Cambio Climático: Una Visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F., pp. 569-579.
- Majid, A.S. 2015. Aboveground biomass and carbon stock estimation in logged-over lowland tropical forest in Malaysia. *International Journal of Agriculture, Forest and Plantation* 1: 1-15.
- Mani, S. y N. Parthasarathy. 2007. Above-ground biomass estimation in ten tropical dry evergreen forest sites of peninsular India. *Biomass and Bioenergy* 31: 284-290.
- Martínez, T.T. 2011. Bosques urbanos, los pulmones de la ciudad. *Especies* 2: 26-27.
- Martínez-Ballesta, M.C., L. López-Pérez, B. Muries, O. Muñoz-Azcarate y M. Carvajal. 2009. Climate change and plant water balance. The role of aquaporins. Sustainable agricultural reviews. En: Lichtfouse, E. (ed.). Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms, Sustainable Agriculture. Springer, París, Francia, pp. 71-89.
- Masera, O.R., M.J. Ordoñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- McPherson, G. 1998. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 215-223.

- MEA, Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystem and human well-being: A framework for assessment. Island press, Washington. En: www.millenniumassessment.org. Última consulta: 08/junio/2017.
- Mendoza-Hernández, P.E., A. Orozco-Segovia, J. A. Meave, T. Valverde y M. Martínez- Ramos. 2013. Vegetation recovery and plant facilitation in a human-disturbed lava field in a megacity: searching tools for ecosystem restoration. *Plant Ecology* 214 (1): 153-167.
- Mendoza-Hernández, P.E. 2013. Comunidades sintéticas para la restauración sucesional del bosque de encino y el matorral xerófilo del Ajusco Medio, Distrito Federal, México. Tesis de doctorado. Posgrado de Ciencias Biológicas, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Mendoza-Hernández, P.E., L. Pedrero-López, A. Rosete-Domínguez y A. Orozco-Segovia. 2016. Estrategias ecofisiológicas para la restauración de un pedregal urbano: el caso del Parque Ecológico de la Ciudad de México. En: Cecon, E. y C. Martínez-Garza (coords.). Experiencias Mexicanas en la Restauración de los Ecosistemas. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 237-274.
- Mendivelso, J.C. e I.M. Arias. 2015. El Antropoceno: aportes para la comprensión del cambio global. *Ar@cne: Revista Electrónica de Recursos en Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales* 203.
- Mendoza-Ponce, A.V. 2008. Efectos de los cambios de uso/cobertura del suelo sobre la biomasa aérea y almacenamiento de carbono en paisajes de bosques templados en Cofre de Perote, Veracruz. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Mokany, K., R.J. Raison y A. Prokushkin. 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12: 84-96.
- Montero, G., R. Ruíz y M. Muñoz. 2005. Producción de Biomasa y Fijación de CO₂ por los Bosques Españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, España.
- De Jong, B. 2012. Step-wise approach to improving greenhouse gas inventories. En: Mora, B., M. Herold, V. De Sy, A. Wijaya, L. Verchot y J. Penman (eds.). Capacity Development in National Forest Monitoring. Experiences and Progress for REDD+. GOFC-GOLD, Bogor, Indonesia, pp. 47-52.
- Mosquera, M.R., A. González-Rodríguez y A. Rigueiro-Rodríguez. 1999. Ecología y Manejo de Praderas. Ministerio de Agricultura, Pesca Alimentación. Asociación Editorial Universidad de España, Madrid, España. 214 pp.

- Návar-Chaidez, J.J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipas thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management* 3: 6-17
- Návar-Chaidez, J.J., J. Nájera y E. Jurado. 2001. Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipas thornscrub in north-eastern México. *Journal of Arid Environments* 47: 281-290.
- Nowak D., J. Stevens, S. Sisinni, C. Luley. 2002. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture* 28: 113–122.
- Nwoboshi, L.C. 1983. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria: I Linear growth and biomass production. *Forest Science* 29(1): 159-165.
- Odum, H. 2006. Niveles Tróficos y Calidad de Energía. Universidad de Florida, Florida, Estados Unidos. 45 pp.
- Ordóñez, J.A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Ordóñez, J.A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología. Semarnap, México, D.F., México. 72 pp.
- Ordóñez, J.A. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3 - 12.
- Orozco-Flores, L.A (en prep.). Fitomasa aérea y almacén de carbono en dos unidades de vegetación del ANP Ecoguardas, Tlalpan, D.F. (México), Tesis profesional. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Orozco-Flores L.A. y Z. Cano-Santana. 2017. Almacén de carbono del matorral xerófilo y del encinar del ANP Ecoguardas, Ciudad de México. En: Paz, P.F. y R. Torres (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017, Programa Mexicano del Carbono, Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada y Universidad Autónoma de Baja California, Ciudad de México, México, pp. 547-552.
- Penton-Fernández, G. 2000. Efecto de la sombra de los árboles sobre el pastizal en un sistema seminatural. Tesis de maestría, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.
- Peralta-Higuera, A., y J. Prado-Molina. 2009. Los límites y la cartografía. En: Lot A. y Cano-Santana Z. (eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México, pp. 27-42.
- Phillipson, J. 1966. Ecological Energetics. Edward Arnold, Londres, Inglaterra. 57 pp.

- Picard, N., L. Saint-André y M. Henry. 2012. Manual de Construcción de Ecuaciones Alométricas para Estimar el Volumen y la Biomasa de los Árboles: del Trabajo de Campo a la Predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Roma y Montpellier. 223 pp.
- Pisanty, I., M. Mazari y E. Ezcurra. 2009. El reto de la conservación de la biodiversidad en zonas urbanas y periurbanas, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F., México, pp. 719-759.
- Quintana-Vega, M.A. 2012. Aprovechamiento integral del bagazo de la piña de *Agave tequilana* Weber: Caracterización de fracciones lignocelulósicas obtenidas por un proceso organosolv. Tesis de Maestría. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, Cuernavaca, Morelos, México.
- Raunkiaer, C.C. 1934. II The life-forms of plants and their bearing on geography. En: Raunkiaer, C. The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography. Universidad de Oxford, Oxford, Inglaterra.
- Razo-Zárate, R., A. J. Gordillo-Martínez, R. Rodríguez-Laguna, C.C. Maycotte-Morales y O.A. Acevedo-Sandoval. 2013. Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 9(1): 17-21.
- REPSA, Reserva Ecológica del pedregal de San Ángel. 2018. Listado de especies. En: <http://www.repsa.unam.mx/index.php/objetivos/caracteristicas/biodiversidad/listado-de-especies/listado-especies-repsa-plantas?showall=1&limitstart=>. Última consultado: 13/junio/2018.
- Reynolds, S.G. y E.A. Jiménez. 2003. Introducción. En: Mondragón-Jacobo, C., S. Pérez-González y M.D. Sánchez. (eds.). El nopal (*Opuntia spp.*) como forraje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, México.
- Rodríguez, B.S. 2008. Crecimiento del arbolado, producción de pasto y efectos edáficos en sistemas silvopastorales fertilizados con lodos de depuradora urbana. Efectos residuales. Tesis de doctorado. Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España.
- Rodríguez-Martínez, J. 2013. Ecología, 3ª. edición. Ediciones Pirámide, Madrid, España. 501 pp.
- Rodríguez-Sánchez, V.M. 2013. Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham. Del paraje el Cedral del Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O.A. Aguirre-Calderón, E.J. Treviño-Garza y R. Razo-Zárate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la

Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* 5(3): 317-327.

- Rojas-García, F. 2004. Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del parque nacional La Malinche: Tlaxcala Puebla. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Rovere, A. 2000. Condiciones ambientales de la regeneración del ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*). *Bosque* 21(1): 57-64.
- Ruiz-Aquino, F., J.I.V. Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortíz, R. Manzanares, A. Fuentes-López y M. Elena. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques* 20(2): 33-48.
- Ruvalcaba-Sánchez, L.I., Z. Cano-Santana, I. Sánchez-Gallén, E. Tovar-Sánchez, C. Anaya-Merchant y D.M. Figueroa-Castro. 2009. Estructura de la comunidad de invertebrados epífitos asociados a *Verbena virgata*. En: Lot A. y Cano-Santana Z. (eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México, pp. 433-440.
- Ryan, M. G., Binkley, D. y J.H. Fownes. 1997. Age-related decline in Forest Productivity: Pattern and Process. *Advances in Ecological Research* 27: 214-262.
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias biológicas* 8: 59-129.
- Rzedowski, J. 1991. El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana* 15: 47-64.
- Santa Regina, I. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *Forest Ecology and Management* 132: 127-141.
- Santiago-Romero, A. y F. Rojas-García. 2013. Estimación del contenido de carbono en la zona ecológica y cultural Bosque de Tlalpan, Distrito Federal. En: Paz, P. F., Wong G. J., Bazan, M. y V. Saynes. (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013, Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Ciudad de México, México, pp. 149-154.
- Scheinvar, L. 2009. Subfamilia Opuntioideae (Cactaceae). En: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México, pp.143-152.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosque del tipo forestal siempreverde. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 13 pp.

- Schulze, E. D., C. Wirth y M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289 (5487): 2058-2059.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2016a. Inventario de emisiones de la CDMX, contaminantes criterio, tóxicos y efecto invernadero. En: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx2014-2/IE-CDMX-2014.pdf>. Última consulta: 13/junio/2018.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2016b. Suelo de conservación. En: http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf. Última consulta: 13/junio/2018.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2017. Suelo de conservación. En: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/suelo-de-conservacion>. Última consulta: 17/diciembre/2017.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2018. Suelo de conservación. En: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/suelo-de-conservacion>. Última consulta: 13/junio/2018.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2009. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. En: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=656. Última consulta: 05/marzo/2016.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. En: http://www.SEMARNAT.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/EN_CC.pdf. Última consulta: 19/enero/2017.
- Siebe, C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 aps AP y sus implicaciones. En: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México, pp. 43-49.
- Siebe, C., P.E. Mendoza-Hernández, S.M. Juárez-Orozco, L. Vázquez-Selem y S. Cram. 2016. Consecuencias de la actividad volcánica del Xitle y el disturbio antrópico sobre las propiedades del suelo y diversidad vegetal del Parque Ecológico de la Ciudad México en el Ajusco medio. En: La Biodiversidad en la Ciudad de México, vol I. CONABIO/SEDEMA, Ciudad de México, México. pp. 75-91.
- Soberón, J., R. de la Maza, A. Hernández, C. Bonfil, S. Careaga, J. Gamboa de Buen, H. García y G. Espinosa. 1991. Reporte técnico final del primer año el proyecto "Restauración ecológica de Lomas del Seminario", Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Coordinación General de Reordenamiento Urbano y Protección Ecológica, México, D.F., México.

- Stuart, W.V., R.G. Oderwald y E.E Ford. 1980. Prism cruising coefficients for Appalachian hardwoods biomass. *J. Appl. For.* 4: 25-26.
- Tipper, R. 1998. Update on carbon offsets. *Tropical Forest Update* 8(1): 2-5.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2014. En: <http://unfccc.int/2860.php>. Última consulta: 09/mayo/2016.
- Valverde, V.T., J.A. Meave, J. Carabias y Z. Cano-Santana. 2005. *Ecología y Medio Ambiente*. Pearson Educación, México, D.F., México. 160 pp.
- Vashum, K.T. y S. Jayakumar. 2012. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests. *Ecosystem y Ecography* 2(4): 2-7.
- Vásquez, A. y H. Arellano. 2012. Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. En: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>. Última consulta: 14/diciembre/2017.
- Vibrans, H. 2011. Malezas de México. En: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/pteridaceae/cheilanthes-bonariensis/fichas/ficha.htm#5.+Biolog%EDA+y+ecolog%EDA>. Última consulta: 15/diciembre/2017.
- Villar, R., B. López-Iglesias, P. Ruíz-Benito, E.G. de la Riva y M.A. Zavala. 2014. Crecimiento de plántulas y árboles de seis especies de *Quercus*. *Ecosistemas Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente* 23(2): 64-72.
- Villers, L. e I. Trejo. 2000. El cambio climático y la vegetación en México. En: García, G. (comp). México: Una Visión Hacia el Siglo XXI. El Cambio Climático en México. Toffer, PUMA, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., México, pp. 57-72.
- Vitousek, P.M. y R.W. Howart. 1991. Estimates of atmospheric deposition and canopy exchange for 3 common tree species in the Netherlands. *Water and Soil Pollute* 73: 61-83.
- Wiant, H.V. y M.S. Fortain. 1980. Oak site index biomass yield in upland Oak and cove hardwood timber types in west Virginia. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Pensilvania, Estados Unidos.
- Zon, R. y W.N. Sparhawk. 1923. *Forest Resources of the World, Vol II*. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, Nueva York, Estados Unidos. 997 pp.

Apéndice 1

Modelos alométricos exponenciales para estimar la biomasa seca (B) de los tallos y ramas en gramos de las plantas perennes de la Reserva del Pedregal de San Ángel, a partir del área basal del tallo a 10 cm de altura (A_{10}) en cm^2 . Los modelos se obtuvieron a partir de plantas cosechadas en diciembre de 1990 y enero 1991 por Cano-Santana (1994).

Espece	Modelo	r^2	N	P
<i>Baccharis conferta</i>	$B= 49.607(A_{10})^{1.186}$	0.955	222	<0.001
<i>Bouvardia ternifolia</i>	$B= 48.618(A_{10})^{1.300}$	0.946	12	<0.001
<i>Buddleja Cordata</i>	$B= 54.544(A_{10})^{1.292}$	0.938	16	<0.001
<i>Eupatorium glabatum</i>	$B= 49.607(A_{10})^{1.186}$	0.955	222	<0.001
<i>Lagascea rigida</i>	$B= 54.163(A_{10})^{1.160}$	1.000	4	<0.001
<i>Loeselia mexicana</i>	$B= 36.198(A_{10})^{0.958}$	0.833	10	<0.001
<i>Opuntia tomentosa</i>	$B= 0.037 (A)^{1.178}$	0.913	31	<0.001
<i>Pittocaulon praecox</i>	$B= 10.064(A_{10})^{1.419}$	0.942	10	<0.001
<i>Stevia salicifolia</i>	$B= 83.013(A_{10})^{1.406}$	0.989	10	<0.001
<i>Verbesina virgata</i>	$B= 70.176(A_{10})^{1.347}$	0.960	10	<0.001
<i>Wigandia urens</i>	$B= 31.976(A_{10})^{1.255}$	0.946	16	<0.001

A = área del cladodio (en cm^2).

Para *Baccharis conferta* y *Eupatorium glabatum* no hay un modelo alométrico específico en la literatura y tampoco se realizó una fórmula, en el caso de *B. conferta* se debió al escaso número de individuos encontrados en el muestreo y en el caso de *E. glabatum* por falta de tiempo de muestreo. Para solucionarlo se utilizó la fórmula general para estimar biomasa seca de las partes leñosas de arbustos de la REPSA.

Modelos para estimar la biomasa seca de los retoños (B , en g) de las plantas perennes de la Reserva del Pedregal de San Ángel, a partir de la longitud (L , en cm) de éstos. Fuente: Cano-Santana (1994).

Especie	Modelo	r^2	N	P
<i>Bouvardia ternifolia</i>	$B= 0.025 L$	0.642	37	<0.001
<i>Buddleja Cordata</i>	$B= 0.590 L$	0.887	28	<0.001
<i>Lagascea rigida</i>	$B= 0.057 L$	0.852	21	<0.001
<i>Loeselia mexicana</i>	$B= 0.017 L$	0.957	26	<0.001
<i>Pittocaulon praecox</i>	$B= 1.267 L$	0.871	28	<0.001
<i>Stevia salicifolia</i>	$B= 0.051 L$	0.894	46	<0.001
<i>Verbesina virgata</i>	$B= 0.131 L$	0.956	27	<0.001
<i>Wigandia urens</i>	$B= 0.801 L$	0.928	30	<0.001

Apéndice 2

Listado de especies y formas de desarrollo y crecimiento encontradas en los tres tipos de estratos en el Parque Ecológico de la Ciudad de México.

Especies herbáceas	Familia	Forma de desarrollo y crecimiento
<i>Asplenium praemorsum</i> Sw.	Aspleaniaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Bidens odorata</i> Cav.	Asteraceae	Terófito, hierba anual
<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth	Orobanchaceae	Hierba perenne
<i>Cheilanthes lendigera</i> (Cav.) Sw.	Pteridaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Cheilanthes bonariensis</i> (Willd.) Proctor	Pteridaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Cheilanthes myriophylla</i> Desv.	Pteridaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Cheilanthes tenuifolia</i> (Burm.f.) Sw.	Pteridaceae	Hierba
<i>Crusea longiflora</i> Willd. ex Roem. & Schult	Rubiaceae	Terófito, hierba anual
<i>Cystopteris fragilis</i> (L.) Bernh.	Woodsiaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Dahlia coccinea</i> Cav.	Asteraceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Dioscorea galeottiana</i> Kunth	Dioscoreaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Echeandia mexicana</i> R.W. Cruden	Anthericaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Gnaphalium americanum</i> P. Mill.	Asteraceae	Hemicriptófito, hierba perenne
<i>Muhlenbergia robusta</i> Hitch.	Poaceae	Caméfito, hierba perenne
No identificada	Orchidaceae	ND
<i>Oxalis corniculata</i> L.	Oxalidaceae	Criptófito, hierba erecta perenne
<i>Pellaea sagittata</i> Cav.	Piperaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Pellaea ternifolia</i> Cav.	Pteridaceae	Criptófito, hierba perenne
<i>Pennisetum clandestinum</i> (Chiov.) Leeke	Poaceae	Hemicriptófito, hierba perenne
<i>Penstemon</i> sp.	Scrophulariaceae	Caméfito, hierba perenne
<i>Phlebodium thysanolepis</i> A. Braun ex Klotzsch	Polypodiaceae	Hierba
<i>Piqueria trinervia</i> Cav.	Asteraceae	Hemicriptófito, hierba perenne
<i>Plumbago pulchella</i> Boiss	Plumbaginaceae	Caméfito, hierba perenne
<i>Rhynchelytrum (Melinis) repens</i> (Willd.) C. E. Hubb.	Poaceae	Hemicriptófito, hierba perenne
<i>Sedum</i> sp.	Crassulaceae	—
<i>Selaginella</i> sp.	Selaginellaceae	Hierba
<i>Setaria grisebachii</i> Fourn.	Poaceae	Terófito, hierba anual
<i>Tagetes lunulata</i> Ort.	Asteraceae	Terófito, hierba anual
<i>Tagetes</i> sp.	Asteraceae	Hierba

Apéndice 2. (Continúa).

Especies arbustivas	Familia	Forma de desarrollo y crecimiento
----------------------------	----------------	--

<i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i> Koch.	Agavaceae	Hemicriptófito, arbusto suculento
<i>Baccharis conferta</i> Kunth.	Asteraceae	Arbusto perenne
<i>Bouvardia ternifolia</i> (Cav.) Schltld.	Rubiaceae	Fanerófito, hierba perenne
<i>Eupatorium glabratum</i> Kunth	Asteraceae	Arbusto
<i>Eupatorium petiolare</i>	Asteraceae	Fanerófito, arbusto
<i>Eupatorium</i> sp.	Asteraceae	Arbusto
<i>Gaudichaudia cynanchoides</i> Kunth	Malpighiaceae	Hemicriptófito, arbusto perenne
<i>Lagascea rigida</i> (Kunth). Stuessy	Compositae	Fanerófito hierba perenne o arbusto
<i>Loeselia mexicana</i> (Lam.) Brand.	Polemoniaceae	Caméfito, arbusto perenne
<i>Opuntia tomentosa</i> Salm-Dyck	Cactaceae	Fanerófito, arbusto suculento
<i>Pittocaulon praecox</i> H. Rob & Brettell	Asteraceae	Fanerófito, arbusto perenne Hemicriptófito, hierba perenne o arbusto
<i>Salvia mexicana</i> L.	Lamiaceae	Caméfito, arbusto perenne
<i>Sedum moranense</i> Kunth	Crassulaceae	Fanerófito, arbusto caducifolio
<i>Sedum oxypetalum</i> Kunth	Crassulaceae	Hemicriptófito, arbusto perenne
<i>Stevia ovata</i> Willd.	Asteraceae	Caméfito, arbusto perenne
<i>Stevia salicifolia</i> Cav.	Compositae	Fanerófito, arbusto perenne
<i>Verbesina virgata</i> Cav.	Asteraceae	Fanerófito, arbusto perenne y arborescente
<i>Wigandia urens</i> (Ruiz y Pavón) Kunth	Hydrophyllaceae	

Especies arbóreas

<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	Ericaceae	Arbusto o árbol
<i>Buddleja cordata</i> Kunth	Loganiaceae	Fanerófito, árbol o arbusto perenne
<i>Buddleja parviflora</i> Kunth	Loganiaceae	Árbol perenne
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl.	Cupressaceae	Arbusto o árbol
<i>Cupressus</i> sp. L.	Cupressaceae	Árbol
<i>Dodonaea viscosa</i> Jacq.	Sapindaceae	Árbol o arbusto perenne
<i>Prunus serotina</i> (Cav.) McVaugh	Rosaceae	Arbusto o árbol
<i>Quercus crassipes</i> Bonpl	Fagaceae	Árbol
<i>Quercus laeta</i> Bonpl	Fagaceae	Árbol
<i>Quercus castanea</i> Née	Fagaceae	Árbol
<i>Quercus laurina</i> Bonpl	Fagaceae	Árbol
<i>Quercus rugosa</i> Née	Fagaceae	Árbol

*Clasificación de las formas de desarrollo y de crecimiento obtenidos del listado de plantas de la REPSA (2018), basados en el sistema de Raunkiær (1934)

Apéndice 3

Biomasa aérea (Mg/ha \pm e.e.) y frecuencia relativa de cada especie del estrato arbustivo del matorral xerófilo sucesional. $N = 9$.

Especie	Biomasa aérea Mg/ha \pm e.e.	Frecuencia (%)
<i>Agave salmiana</i> var. <i>ferox</i>	2.53 \pm 0.79	10.14
<i>Baccharis conferta</i>	0.07 \pm 0.07	2.30
<i>Bouvardia ternifolia</i>	0.02 \pm 0.01	6.45
<i>Buddleja cordata</i>	1.41 \pm 1.03	3.23
<i>Eupatorium glabratum</i>	1.34 \pm 1.13	5.53
<i>Lagascea rigida</i>	0.21 $\times 10^{-3}$ \pm 0.21 $\times 10^{-3}$	0.46
<i>Loeselia mexicana</i>	0.07 \pm 0.04	16.13
<i>Opuntia tomentosa</i>	0.08 \pm 0.03	16.13
<i>Pittocaulon praecox</i>	5.67 $\times 10^{-5}$ \pm 3.78 $\times 10^{-5}$	0.92
<i>Sedum oxypetalum</i>	.1.09 \pm 0.61	9.22
<i>Stevia salicifolia</i>	0.20 \pm 0.19	5.99
<i>Verbesina virgata</i>	0.33 \pm 0.13	15.67
<i>Wigandia urens</i>	0.07 \pm 0.04	7.83

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar por agradecer a mi segundo hogar, la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual me ha dado una excelente educación, la oportunidad de mejorar día con día la versión de mí misma y de encontrar a mis amigos incondicionales. En segundo lugar, a la Facultad de Ciencias y al Laboratorio de Interacciones y Procesos Ecológicos, lugares que han sido un parteaguas en mi vida ya que me brindaron todas las herramientas necesarias para desempeñarme como profesionista.

Además, quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron, en mayor o en menor grado, a terminar esta tesis, ya que sin su apoyo no hubiera podido concluir satisfactoriamente.

Agradezco al Dr. Zenón Cano Santana por estar a mi lado a lado durante todo el desarrollo de la tesis, por su tiempo y conocimientos compartidos, pero sobre todo por su amistad.

También agradezco la beca otorgada por el proyecto PAPIIT-UNAM IV200117 “Análisis ecosocial de una reserva urbana para la sustentabilidad en el campus de Ciudad Universitaria”, a cargo de los doctores Luis Zambrano, Zenón Cano Santana y Alicia Castillo.

Agradezco a los doctores Pedro Eloy Mendoza Hernández y María Guadalupe Barajas Guzmán y las maestras en ciencias Yuriana Martínez e Irene Pisanty por aceptar ser parte del jurado, por sus comentarios, recomendaciones y su tiempo invertido para la revisión de este trabajo. En especial, gracias al Dr. Mendoza por sus asesorías, sus datos y visita al PECM y a la M. en C. Yuriana por su apoyo en la identificación de las plantas.

Al M. en C. Iván Castellanos Vargas por el apoyo técnico que me brindó durante la obtención de mis resultados, por su revisión y comentarios que mejoraron la versión de este trabajo.

A mi compañero Luis Alberto Flores Orozco, por proporcionarme su base de datos, permitirme hacer uso de ellos y por haber compartido conmigo su conocimiento en campo.

Agradezco enormemente y quedo en deuda con todas las personas que me apoyaron en el trabajo de campo: Alfredo Martínez (por estar conmigo incondicionalmente y esforzarse como si el proyecto fuera suyo), a los biólogos Julián Pineda Ríos, Surya González Jaramillo y Paulina Corona Tejeda, y a mis compañeros Ethel Luna y Juan Pablo Camacho.

Por último, agradezco a todos los funcionarios que protegen al Parque Ecológico de la Ciudad de México, quienes me permitieron entrar a realizar trabajo de campo y cuidaron de mí durante mis visitas.