

DETERMINACIÓN DEL CARBONO TOTAL EN BOSQUES MIXTOS DE *Pinus patula* Schl. et Cham.

Determination of Total Carbon in Mixed Pine Forests (*Pinus patula* Schl. et Cham.)

M. Acosta-Mireles^{1‡}, F. Carrillo-Anzures¹ y M. Díaz Lavariega²

RESUMEN

Se determinaron los almacenes de carbono (C) en el estrato aéreo y el suelo en rodales de diferente composición de especies arbóreas en la región de Tlaxco, Tlaxcala. El C de la parte aérea se obtuvo midiendo la biomasa de cada componente. La biomasa de los árboles se obtuvo mediante ecuaciones alométricas y se aplicó un factor de 0.46 para obtener el C de cada árbol. Para *Abies religiosa*, pinos y hojosas, se utilizó el factor único de 0.5. Para obtener la biomasa de las hierbas y arbustos, se colectó el material en 1 m², se secó y pesó; el resultado se multiplicó por el factor 0.5 para obtener la cantidad de carbono. Para determinar la biomasa del mantillo, se colectó el material encontrado en un cuadro de 0.25 m² y se siguió el mismo procedimiento. El porcentaje de C del mantillo se determinó en submuestras de este material. Para determinar el C de la parte subterránea, se obtuvieron muestras de suelo a dos profundidades (0-20 cm y 21-40 cm), éstas se secaron y se separó de las piedras y las raíces. Las submuestras de suelo se secaron y molieron en un molino tipo Speck 8000 Mixer/Mill; al material ya tamizado se le determinó el porcentaje de C, lo que representó el C de la parte mineral del suelo, y al agregarle el C correspondiente a las raíces, se obtuvo el C total de la parte subterránea. En el rodal de Oyamel-pino se encontró la mayor cantidad de C (301.9 Mg ha⁻¹) y la menor en el de pino (183.2 Mg ha⁻¹). En todos los rodales, la mayor cantidad de C se concentró en la parte subterránea, principalmente en los primeros 20 cm; se observó una disminución al aumentar la profundidad del suelo. En el estrato aéreo los que aportaron la mayor cantidad de C fueron los árboles y este factor se relacionó directamente con el área basal.

Palabras clave: almacenes de carbono en el suelo, estrato aéreo, ecuaciones alométricas.

SUMMARY

Carbon stocks were estimated in the aboveground (AG) and belowground (BG) compartments in stands differing in species composition in the Tlaxco, Tlaxcala, region in central Mexico. The AG stock was evaluated based on the biomass of each species. The biomass in pine was obtained using allometric equations with a 0.5 factor to derive the C content of individual trees. For mexican fir (*Abies religiosa*) a factor of 0.46 was used. Biomass in grass and herbs was obtained in 1 m² plots to obtain oven-dry biomass; in this case a 0.5 factor was used to convert biomass to C. Litter biomass was studied in some 0.25 m² quadrats. Dry matter was obtained and then the carbon percent determined. The BG carbon content was studied in soil samples that were taken at 0-20 cm and 21-40 cm layers. The subsamples of soil were dried and milled in a mill type Speck 8000 Mixer/Mill. Of the sifted material, the percentage of C was determined, which represented the C of the mineral part of the soil, and when C corresponding to the roots was added, the total C of the floor part was obtained. The greatest amount of C (301.9 Mg ha⁻¹) was concentrated in the fir-pine stand and the least in the pine stand (183.2 Mg ha⁻¹). In all the stands, the largest amount of C was concentrated in the upper 20 cm of the forest floor, decreasing with increasing depth of the soil. In the above-ground stratum, the trees contributed with the largest amount of C and this factor was directly related to basal area.

Index words: soil carbon stocks, above-ground stratum, allometric equations.

INTRODUCCIÓN

La emisión masiva de gases de efecto invernadero (GEI) en el último siglo ha provocado el calentamiento del planeta afectando los procesos atmosféricos (IPCC, 2001). El aumento de los GEI incrementa la capacidad

¹ Campo experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56230 Chapingo, Estado de México.

[‡]Autor responsable (acostamm@colpos.mx)

² Comisión Nacional Forestal. 36630 Irapuato, Guanajuato.

atmosférica de absorber radiaciones infrarrojas y modificar el forzamiento radiativo que eleva la temperatura superficial en la troposfera, en la que el clima terrestre opera y donde el efecto invernadero afecta prioritariamente (Shimel, 1995; Melillo *et al.* 1996; González *et al.*, 2004).

Los principales GEI son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃); además de una serie de gases creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo (IPCC, 2001).

El CO₂ es el gas que más contribuye al calentamiento global (Houghton y Woodwell, 1989; Schneider, 1989; Lashof y Ahuja, 1990; Ben *et al.*, 1995). Una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa, mediante la fotosíntesis; y en el suelo, a través de la acumulación de materia orgánica (MO) (Ávila *et al.*, 2001).

Los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan CO₂ como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de MO. Este servicio ambiental que proveen bosques o selvas como secuestradores de carbono (sumideros) permite equilibrar la concentración de este elemento (Torres y Guevara, 2005; Breymeyer *et al.*, 1996; Shaver y Aber, 1996). El sistema suelo-vegetación desempeña un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ dependiendo de la velocidad de formación y descomposición de la materia orgánica (Segura *et al.*, 2005). El suelo es el almacén de carbono más importante en los ecosistemas terrestres, en general, y forestales, en particular. La mayor concentración de este elemento se encuentra en las capas más superficiales del suelo.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) se adoptó durante La Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, en 1992, y entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Dicha convención tuvo como objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, con el fin de no alcanzar niveles que impidan interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.

Con el fin de reducir los costos que implica cumplir con estos compromisos, los países desarrollados (Anexo 1) del Protocolo de Kyoto pueden recurrir a (mecanismos de desarrollo limpio) MDL que son las siguientes opciones: I. Proyectos de energía renovable (hidroeléctricos, eólicos, biomasa, solares); II. Proyectos

de eficiencia energética y reingeniería de procesos (iluminación, potencia, ecotecnologías en vivienda, mejoramiento en plantas generadoras de energía, etc.); III. Proyectos de cambio de combustible (sustitución de gasolina por gas natural, uso de biocombustibles); IV. Proyectos de gestión de residuos (captura o uso de emisiones de metano en rellenos sanitarios y de estiércol en granjas pecuarias), y V. Proyectos forestales (captura de carbono por reforestación y forestación comercio de emisiones (SEMARNAT, 2001).

El objetivo de esta investigación fue determinar la cantidad de C total (árboles, arbustos, hierbas, mantillo y suelo) presente en bosques bajo manejo de *Pinus patula* Schl. et Cham., mediante variables fáciles de calcular, en predios de la región de Tlaxco, Tlaxcala.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en dos predios contiguos bajo aprovechamiento forestal: Tlacotla y El Nacimiento en el ejido Mariano de Matamoros, que se ubica a aproximadamente 5 km al noroeste de la población El Rosario, municipio de Tlaxco, Tlaxcala. Los predios están situados entre las coordenadas 19° 40' 15" y 19° 43' 00" N; 98° 12' 49" y 98° 15' 12" O, con una altitud promedio de 2875 m. Al norte colindan con el estado de Puebla; al sur con el ejido Casa Blanca; al este con el ejido El Rosario, y al oeste con los ejidos Casa Blanca y Lagunilla. En el relieve predominan las laderas intermedias que, en su mayoría, corresponden al bosque de oyamel, pino-oyamel y oyamel-encino. La zona boscosa se encuentra en la parte media y alta de los lomeríos; su pendiente varía del 5 al 55%, sin embargo, la más frecuente es de 30%. Los suelos son de origen residual y volcánico, tienen un desarrollo incipiente o moderado, generalmente poseen textura media o arenosa. Predominan los suelos con una profundidad menor de 10 cm (Litosoles) asociados a una capa superficial suave de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes (Feozems háplicos). La vegetación arbórea del ejido está dominada por bosques de clima templado cuyos géneros dominantes son *Pinus*, *Abies*, *Quercus* y otras latifoliadas como *Agnus sp*, *Arbutus sp*.

Se realizó la rodalización de acuerdo con la dominancia de las especies arbóreas en cada uno de los predios; con esto se determinó la composición de los rodales, o sea que, si una especie es la más abundante del rodal, adquiere el primer nombre. Por ejemplo, un rodal de pino-encino estará dominado por el

género *Pinus*, aunque no se especifique la especie. Bajo este criterio, los rodales encontrados en el área de estudio fueron: pino patula-encino-hojosas (Ppeh); oyamel-pino patula (OPp); oyamel-pino patula-encino (OPpe); pino patula (Pp); pino patula-oyamel (PpO); y pino patula-oyamel-encino (PpOe) (Figura 1).

En este trabajo se utilizó la metodología que se describe en Monreal *et al.* (2005), Etchevers *et al.* (2002; 2005) para determinar el C. Se obtuvieron muestras del estrato aéreo (árboles, arbustivo-herbáceo y mantillo) y subterráneo (suelo + raíces en dos profundidades, 0-20 cm y 21-40 cm), en sitios de 1000 m², elegidos de manera aleatoria, pero tomando en cuenta que su composición fuera contrastante entre ellos y que el mayor componente fuera el *Pinus patula*. Se ubicaron

por lo menos dos sitios en cada rodal, los rodales muestreados fueron: Peh = pino-encino-hojosas; Op = oyamel-pino; Ope = oyamel-pino-encino; P = Pino; Po = pino-oyamel y Poe = pino-oyamel-encino; en el rodal OPpe sólo se muestreó un sitio debido a que la abundancia de *Pinus patula* era mínima. En total, se tomaron muestras en 34 sitios, 32 en el predio Tlacotla y sólo dos en el predio El Nacimiento, debido a la poca abundancia de *Pinus patula* (Figura 1).

Biomasa y Contenido de C en el Estrato Aéreo

Biomasa y contenido de C en árboles. En cada sitio seleccionado se midió el diámetro normal de todos los árboles; el promedio fue mayor de 7.5 cm. En el ámbito

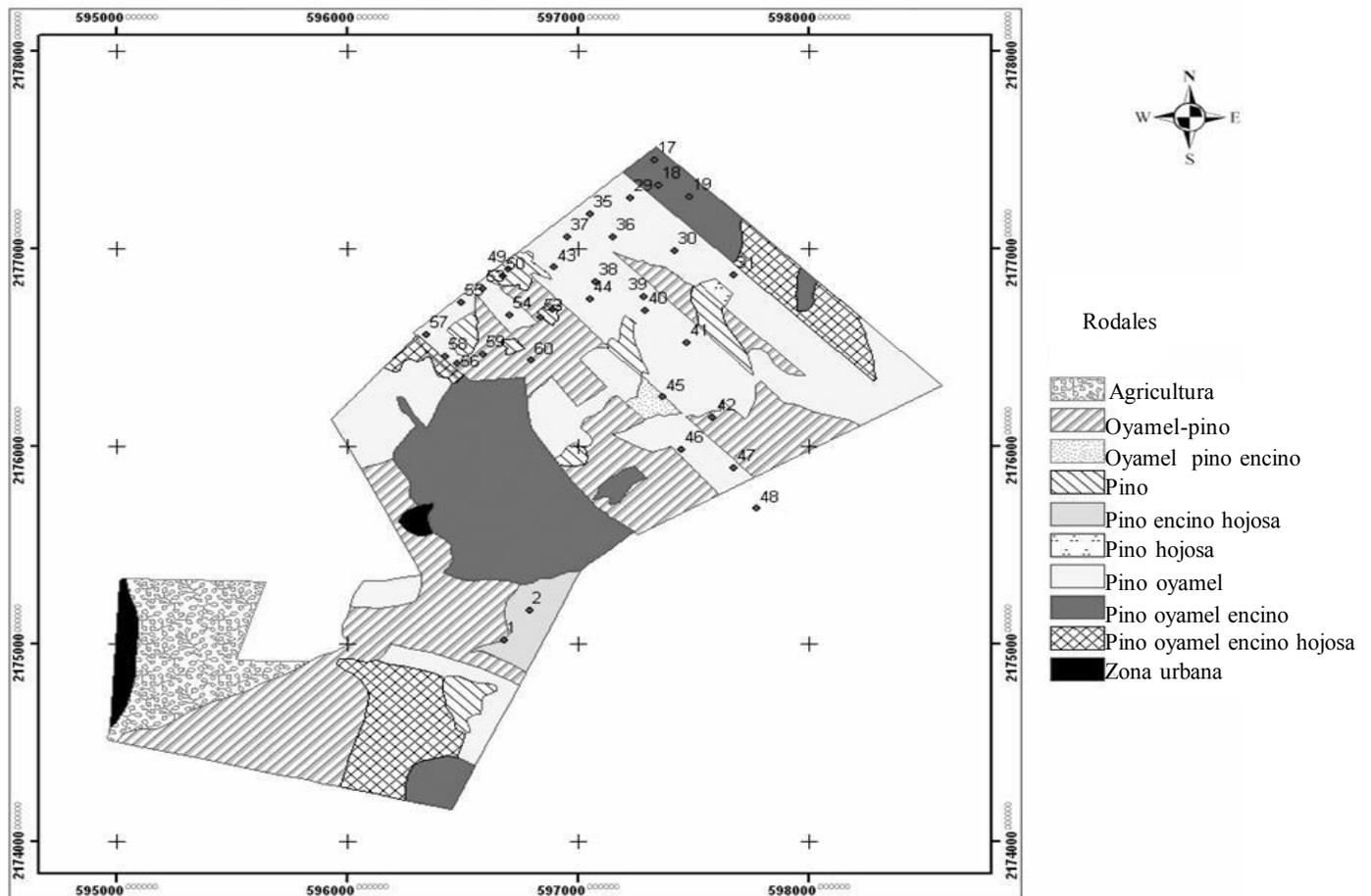


Figura 1. Mapa de los rodales y distribución de los sitios de muestreo en los predios Tlacotla y el Nacimiento, Tlaxco, Tlaxcala.

forestal, la categoría mínima inventariable para un árbol es de 10 cm. Los árboles más pequeños se consideran como renuevo o regeneración (Avery y Burkhart, 1994). Con estos datos se aplicaron ecuaciones alométricas para determinar la cantidad de biomasa en cada árbol.

Las ecuaciones alométricas utilizadas para la determinación de biomasa fueron las siguientes:

Pinus patula y otras especies de pinos:

$$B = 0.0948 * DN^{2.4079} \text{ (Díaz, 2007)}$$

Abies religiosa:

$$B = 0.0754 * DN^{2.513}$$

Alnus sp:

$$B = 0.11765 * DN^{2.23} \text{ (Acosta et al., 2002)}$$

Quercus sp:

$$B = 0.1033 * DN^{2.39} \text{ (Acosta et al., 2002)}$$

donde:

B = biomasa (kg)

DN = diámetro normal (cm)

En el caso de los pinos, la cantidad de C se obtuvo multiplicando la biomasa por el factor 0.5, el cual significa que el 50% de la biomasa del árbol es C (Díaz *et al.*, 2007). Los árboles menores de 7.5 cm (renuevo) se cuantificaron junto con el estrato arbustivo y herbáceo, más adelante se explica la forma en que se muestreó este estrato.

La concentración de C en la madera del fuste de *Quercus* sp. es de 47% y del follaje 49%; para *Alnus* sp. es de 51.5% y 52%, respectivamente (Figuroa *et al.*, 2005). Para estas especies también se utilizó el mismo factor que para los pinos, pues aunque pueden variar ligeramente las concentraciones de C para cada región, dicha variación no es significativa. Consecuentemente, se consideró aceptable utilizar el 50%; sobre todo para aquellas especies en las cuales aún no se ha determinado la concentración de C. Para *Abies religiosa*, el factor que se utilizó fue de 0.4648.

Con la sumatoria de la cantidad de C de los árboles presentes en un sitio, se obtuvo el total de C en 0.10 ha. Adicionalmente, también se obtuvo el área basal (AB) promedio de cada sitio.

Biomasa y contenido de C en el estrato arbustivo, herbáceo y renuevo. Para determinar el peso de la biomasa seca de hierbas y arbustos, se ubicaron dos sitios de muestreo de 1 m², uno ubicado en el norte y

otro en el sur de la parcela experimental, tomando como referencia el centro del sitio donde se midieron los árboles. En estos sitios se colectó todo el material vegetal de los arbustos, hierbas y el renuevo.

Para determinar el peso de la biomasa del material colectado en campo, se realizó un secado en un tunel hasta alcanzar un peso constante; pues una décima parte de dicho elemento es humedad, por ello se secó en una estufa durante 72 horas a 100 °C. Este procedimiento se aplicó a todo el material restante para determinar la biomasa. Su contenido de C se determinó a partir del 50% de su biomasa (Acosta- Mireles *et al.*, 2002).

Biomasa y contenido de C en hojarasca o mantillo.

El lugar de 1 m² donde se colectaron los arbustos, las hierbas y el renuevo, se dividió en cuatro partes. En una de 50 x 50 cm de superficie (0.25 m²) se colectó todo el mantillo. Al igual que los arbustos, hierbas y renuevo, las muestras de mantillo fueron clasificadas por predio y sitio, y luego sometidas a secado siguiendo la misma metodología que para el componente anterior. Puesto que la composición de C en el mantillo es muy variable, se tomaron aleatoriamente 32 submuestras para obtener la cantidad media de C en este material.

En un analizador automático de C total modelo Shimadzu TOC 5000-A, se determinaron los porcentajes de C de los diferentes componentes para las submuestras del lado norte; el resultado se promedió y se aplicó para las submuestras del lado sur. La biomasa del mantillo se multiplicó por el porcentaje de C obtenido de las submuestras y de este modo se obtuvo la cantidad de C total.

Estimación de biomasa y contenido de C en la parte subterránea. Con el uso de una barrena para muestreo de suelo se obtuvieron ejemplares en los mismos sitios en donde se muestreó el mantillo. La barrena Soil Sampling Equipment (AMS) utilizada, consta de un cilindro de 20 cm de largo y 4.17 cm de diámetro, la cual puede proporcionar muestras de suelo inalteradas (Acosta *et al.*, 2002). Las profundidades de muestreo fueron de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm.

Las muestras de suelo se secaron al aire sin utilizar una estufa. Una vez seco el suelo, se separaron las raíces detectadas a simple vista utilizando un tamizador y unas tenazas; también se separaron las raíces y las piedras.

Después de realizar lo anterior, las muestras de suelo fueron disgregadas con un martillo. Una vez homogeneizadas se tomó una submuestra de aproximadamente 5 g por cada muestra y se secaron en una estufa a 105 °C durante 2 h; después se trituraron

en un molino tipo Speck 8000 Mixer/Mill durante 3 min (tiempo estandarizado en un estudio realizado por Acosta-Mireles *et al.*, 2002), esto asegura que por lo menos el 90% del material pase por una malla 100. Una vez molida las muestras, se procedió a secarlas por segunda vez a 105 °C durante 2 h y, finalmente, se colocaron en un analizador automático de C total Shimadzu TOC 5000-A.

Para estimar la cantidad de C almacenado en el suelo se requiere saber la densidad aparente de éste. Por ello, en el momento de realizar el muestreo en campo se midió la longitud de cada muestra de suelo y, con el dato del diámetro de la barrena, se determinó su volumen. Los factores de densidad que se utilizaron para obtener el volumen de piedras fue de 2.5 g cm⁻³ y el de las raíces fue de 0.3 g cm⁻³. Con estos datos, se debe restar a la muestra de suelo la cantidad del volumen de las piedras y raíces para determinar adecuadamente la densidad aparente de éste, con la siguiente fórmula (Acosta *et al.*, 2002).

$$D_{Ap} = \frac{P_{ss}}{0.7854 * DB^2 * pm - V_{oe}}$$

donde: D_{Ap} = densidad aparente del suelo (g cm⁻³); P_{ss} = peso de suelo seco (g); DB = diámetro de la barrena (cm); P_m = profundidad de la muestra (longitud del cilindro en cm); V_{oe} = volumen ocupado por material diferente al suelo mineral (raíces, piedras, etc.); 0.7854 = factor que resulta de dividir π/4.

Para determinar la cantidad de C acumulado en el componente suelo se empleó la siguiente fórmula (Acosta *et al.*, 2002):

$$CC = P_m * D_{Ap} * \%C$$

donde: CC = cantidad de carbono (Mg ha⁻¹); P_m = profundidad de la muestra (cm); D_{Ap} = densidad aparente del suelo (g cm⁻³); C = porcentaje de carbono por cada muestra.

La cantidad de C por cada profundidad se determinó con la ecuación anterior y el total de C es la suma de todas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El C acumulado de los 34 sitios muestreados se expone en el Cuadro 1. Los resultados del contenido de C se presentan en la Figura 2. De acuerdo con los seis

rodajes muestreados de la vegetación forestal encontrada en el área de estudio, el rodal que presentó mayor contenido de C fue el de pino-oyamel (Po), con 300.9 Mg ha⁻¹; de este total 212 Mg ha⁻¹, que representa poco más del 70%, se encontró en el suelo de 0 a 40 cm de profundidad. El rodal que presentó menor contenido de C fue el de pino (P) con 183.2 Mg ha⁻¹, en el que cada uno de sus componentes es relativamente bajo en

Cuadro 1. Resultados del contenido de carbono por cada componente en los sitios muestreados.

Predio	Sitio	Árboles	H+Arb [†]	Mantillo	Suelo	Total
----- Mg ha ⁻¹ -----						
Nacimiento	1	108.13	7.45	25.37	318.2	459.13
Nacimiento	2	72.77	4.19	21.44	120.6	218.99
T-1	17	14.13	0.89	21.43	286.5	322.95
T-1	18	56.39	1.01	27.93	286	371.33
T-1	19	95.42	1.23	13.45	363.4	473.5
T-2	29	67.52	0.84	9.51	225.2	303.02
T-2	30	105.38	0.32	25.36	373	504.06
T-2	31	145.93	0.19	25.96	395.5	567.59
T-3	35	46.32	1.06	19.72	352.9	420
T-3	36	47.86	1.26	18.26	328.3	395.64
T-4	37	59.09	0.31	15.19	350.2	424.74
T-4	38	51.12	0.64	9.26	313.8	374.85
T-4	39	68.65	0.98	19.96	272.9	362.54
T-4	40	37.54	5.79	17.23	397.1	457.67
T-4	41	58.68	3.6	7.25	460.3	529.86
T-4	42	68.44	0.67	20.08	573.2	662.41
T-5	43	51.29	1.35	22.39	433.8	508.8
T-5	44	39.09	0.46	19.46	336.3	395.3
T-5	45	70.82	1.7	15.53	0	88.06
T-5	46	114.62	0.61	10.53	606.4	732.19
T-5	47	107.59	1.32	9.44	516	634.29
T-5	48	107.39	0.58	10.54	760.6	879.08
T-6	49	42.85	0.52	18.67	80.82	142.85
T-6	50	51.52	0.1	23.35	144	218.98
T-6	51	41.65	0.29	46.84	280.9	369.73
T-6	52	43.97	0.17	17.98	286.5	348.65
T-7	53	38.68	0.76	14.33	286	339.79
T-7	54	58.08	1.63	11.23	351	421.89
T-8	55	55.91	1.04	8.78	695	760.73
T-8	56	78.39	1.07	24.36	564.3	668.13
T-8	57	101.63	0.5	13.83	438.1	554.05
T-8	58	71.44	3.88	22.85	477.9	576.02
T-8	59	81.81	1.16	7.15	269	359.11
T-8	60	106.65	1.04	14.42	321	443.12
	Máximo	145.93	7.45	46.84	760.6	879.08
	Mínimo	14.13	0.1	7.15	0	88.06
	Promedio	69.61	1.43	17.91	360.7	449.68

[†]H+Arb = hierbas + arbustos.

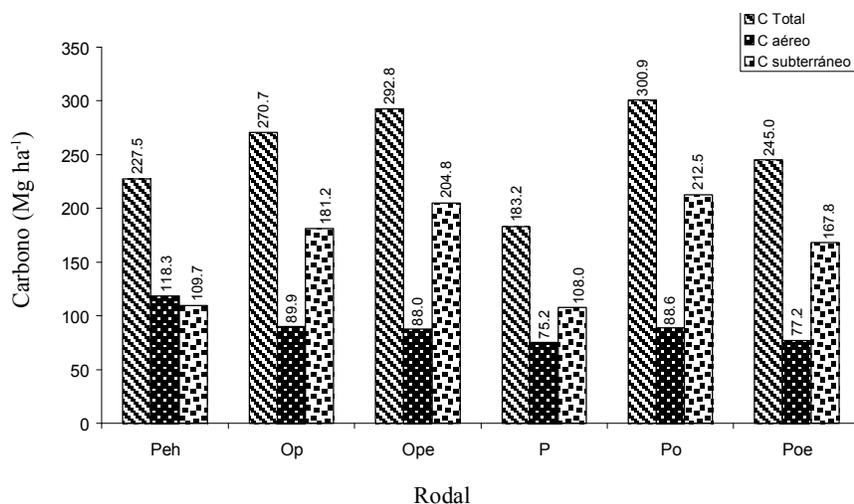


Figura 2. Carbono presente en la parte aérea, subterránea y total, por rodal (Mg ha⁻¹). Peh = pino-encino-hojosas; Op = oyamel-pino; Ope = oyamel-pino-encino, P = pino, Po = pino-oyamel y Poe = pino-oyamel-encino.

comparación con los demás rodales, excepto en el mantillo, pues en éste se encontró mayor cantidad de C (29.6 Mg ha⁻¹) (Cuadro 2). En éste se observa que la cantidad de C disminuye rápidamente con la profundidad del suelo y es que la mayor actividad de desarrollo de las raíces se realiza en los primeros cm del suelo porque ahí se encuentran las raíces de las hierbas, arbustos y muchas de las raíces finas de los árboles, aunque para obtener una adecuada estimación de la biomasa de las dichas raíces, sería recomendable utilizar muestreos más tediosos que involucran grandes volúmenes de suelo (Shaver y Aber, 1996).

A pesar de que sólo se obtuvieron muestras hasta los primeros 40 cm de suelo, la cantidad de C en

este almacén es superior a la encontrada en la parte aérea, incluido los árboles, H+A y mantillo juntos; lo que indica es que el suelo es uno de los almacenes de C de gran importancia en muchos de los ecosistemas agrícolas y forestales (Schlesinger, 1986).

El promedio del C en la parte aérea de los rodales representó aproximadamente el 36% con respecto al total. Éste se distribuyó en los árboles, hierbas+arbustos y mantillo, tal como se muestra en la Figura 3.

Los árboles son el componente de la parte aérea que más C aportan (Figura 3). El rodal que presentó mayor contenido de C en el estrato aéreo fue el de pino-encino-hojosas (Peh) con 89.1 Mg ha⁻¹, aproximadamente el doble del que se determinó en el rodal de pino (P),

Cuadro 2. Características que presenta cada rodal de donde se obtuvieron las muestras para medir el carbono.

Rodal [†]	Árboles ha	DN [‡] cm	Área basal m ²	Contenido de carbono							Total
				Árboles	Hierbas + arbustos	Mantillo	Total aéreo	Suelo 0-20	Suelo 21-40	Total subt. [§]	
Peh	600.0	19.3	28.5	89.1	5.8	23.4	117.8	65.3	44.4	109.7	227.5
Op	682.5	26.7	27.8	74.2	0.8	14.9	89.5	116.7	64.5	181.2	270.7
Ope	380	23.9	25.44	70.8	1.7	15.53	88.0	121.1	83.7	204.8	297.1
P	1646.7	12.4	23.4	45.3	0.3	29.6	75.3	63.0	45.0	108.0	183.2
Po	442.9	25.7	25.5	71.3	1.3	16.0	88.4	129.4	83.1	212.5	300.9
Poe	440.0	21.1	21.4	55.2	1.0	20.9	77.2	112.2	55.6	167.8	245.0
suma	4192.0	129.1	151.9	405.9	11.0	120.4	536.2	607.7	376.3	984.0	1524.4
Prom.	698.7	21.5	25.3	67.7	1.8	20.1	89.4	101.3	62.7	164.0	254.1

[†]Peh = pino-encino-hojosas, Op = oyamel-pino, Ope = oyamel-pino-encino, P = pino, Po = pino-oyamel y Poe = pino-oyamel-encino; [‡] DN = diámetro normal; [§] subt. = subterráneo.

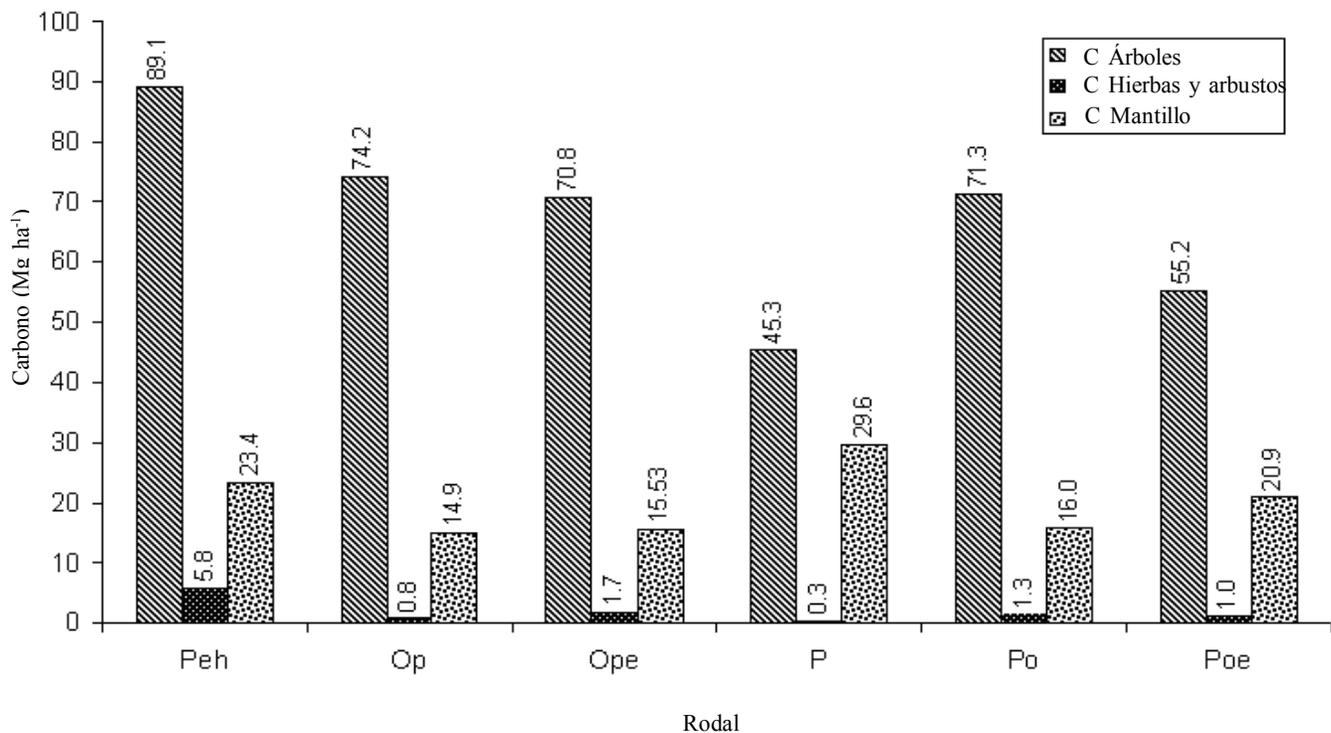


Figura 3. Distribución del carbono aéreo. Peh = pino-encino-hojosas; Op = oyamel-pino; Ope = oyamel-pino-encino, P = pino, Po = pino-oyamel y Poe = pino-oyamel-encino.

que fue el que presentó la menor cantidad de C acumulado, a pesar de que fue éste el que presentó el mayor número de árboles por hectárea y su promedio del área basal (AB) no fue el más bajo. Tal comportamiento se puede atribuir a que el diámetro normal (DN) promedio del rodal de pino fue de 12.4 cm, valor inferior al promedio del DN de los demás rodales (> 19 cm). Si el objetivo de los dueños de los bosques fuera solamente la captura de carbono, habría que analizar cuál sería la mezcla de especies adecuada para obtener una mayor cantidad de C. Sin embargo, el objetivo puede ser cosechar la madera, ya sea para la construcción de muebles, la fabricación de papel, etc. Si esto fuera así, se requeriría de un análisis más detallado acerca de los beneficios obtenidos por cada componente y el tiempo que se necesario para obtenerlos.

Al hacer un análisis de regresión para determinar la cantidad de C del estrato arbóreo por ha a partir de variables del rodal fáciles de medir, como el DN promedio o el AB, se encontró que el coeficiente de determinación para relacionar el contenido de C a partir del DN fue bajo o sea la $R^2 = 0.32$, lo cual quiere decir que el DN promedio de un rodal no es un buen indicador de la cantidad de C presente en el estrato arbóreo de

ese rodal, porque se requiere también saber el número de árboles por hectárea. Sin embargo, una variable que sí puede ser un buen indicador del contenido de C por rodal, es el AB ya que, como se puede comprobar en la Figura 4, donde se relaciona el área basal promedio con el contenido de C en cada rodal, el valor de $R^2 = 0.896$. En la misma figura se observa que el AB es directamente proporcional a la cantidad de C del estrato arbóreo que tiene un rodal, ya que al aumentar el área basal, aumenta también la cantidad de éste. Dicho comportamiento se debe a que, para estimar la biomasa de los árboles, por lo general se utiliza una ecuación en la cual la variable independiente es el DN y el AB de un rodal está en función de la suma de las áreas basales individuales que proyecta cada árbol dentro del rodal, mismas que se obtiene midiendo el DN de cada árbol. En sí, el AB es un indicador de la densidad y mientras mayor densidad muestre un rodal, más se incrementa su cantidad de biomasa y C.

Contenido de C en Hierbas y Arbustos

La cantidad de C en el componente hierbas + arbustos varió entre cada rodal. En los rodales oyamel-pino (Op), pino (P) y pino-oyamel-encino (Poe),

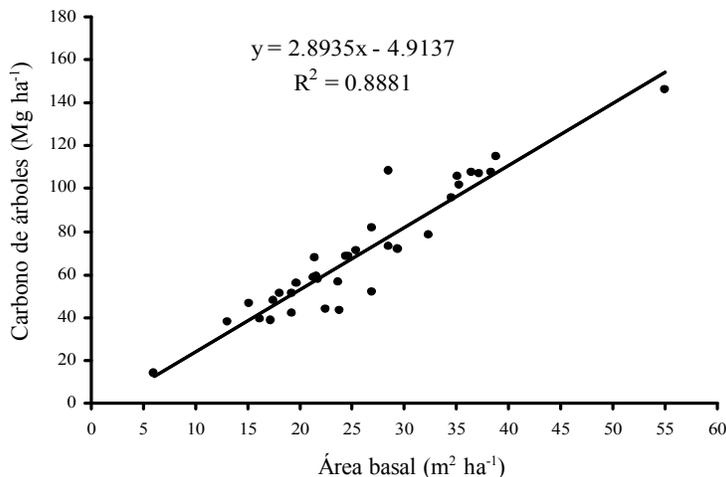


Figura 4. Relación área basal con el contenido de carbono del estrato arbóreo.

el carbono en éstas no rebasó 1 Mg ha⁻¹; por otro lado, los rodales oyamel-pino-encino (Ope) y (Po) no superaron los 2 Mg ha⁻¹. El rodal que presentó mayor cantidad de C fue el de pino-encino-hojosa (Peh), con casi 6 Mg ha⁻¹. Estas variaciones están sujetas al efecto del clima, del suelo y de otros factores como podría ser el grado de densidad en que se encuentre el dosel, aunque este último es el que pudiera influir más en dichas variaciones, pues el clima y el suelo no varían considerablemente de un rodal a otro.

Contenido de C en el Mantillo

El mantillo aporta una cantidad importante de C al componente parte aérea. En promedio, el contenido de C en el mantillo fue de 43.8%, con una desviación estándar de 3.33. Figueroa *et al.* (2005) encontraron que la concentración media de C en la hojarasca de un bosque de aile, liquidámbar, encino y pino fue de 45.2% con una desviación estándar de 2.23. Sin embargo, en dicho estudio, para el caso del bosque de pino, se obtuvo una concentración del 48.52%. Esto indica que la concentración de C en la hojarasca puede variar entre cada región, principalmente por la diferencia de especies arbóreas y arbustivas que forman parte de los estratos superiores y del sotobosque.

El porcentaje de C de la hojarasca para cada sitio se utilizó para determinar la cantidad que aporta este componente al almacén total de la parte aérea de los bosques. Hay varios factores que pueden alterar la variación en la cantidad de biomasa en la hojarasca, por ejemplo los factores climatológicos, pues si hay vientos

fuertes, lo más probable es que la cantidad de ésta se incremente de manera considerable. Por otra parte, es necesario mencionar que cuando la cantidad de biomasa del mantillo es relativamente alta, representa un riesgo para la generación de incendios y, por lo tanto, para la emisión de CO₂ por la quema de éste; consecuentemente, en lugar de ser un almacén de carbono, se puede convertir en una fuente de CO₂. Otros factores que pudieran influir son la densidad y la edad del arbolado, ya que entre más densa y madura esté una masa, lo probable es que exista una mayor cantidad de hojarasca.

Contenido de C en el Estrato Subterráneo

El suelo juega un papel muy importante en el reciclaje y almacenaje de C mediante los procesos de desnitrificación y descomposición de la materia orgánica, pues tiene una gran capacidad para secuestrar C acumulándolo por miles de años (Melillo, *et al.*, 1996).

Las muestras analizadas en el laboratorio para la profundidad 0 a 20 cm presentaron un promedio de 7.92% de contenido de C, con una desviación estándar de 3.1 y 5.28% para la profundidad de 20 a 40, con una desviación estándar de 2.44 (Figura 5).

Como se puede observar, la cantidad de C presente en la profundidad de 0 a 20 cm, supera con el 35.1% a la profundidad de 21 a 40. En el estudio realizado por Monreal *et al.* (2005), los autores encontraron que, en los sistemas con vegetación forestal, el C acumulado en la primera capa del suelo (0 a 15 cm) fue casi el doble del encontrado a la profundidad de 15 a 30 cm, lo que indica que en la primera capa se concentra más el C del

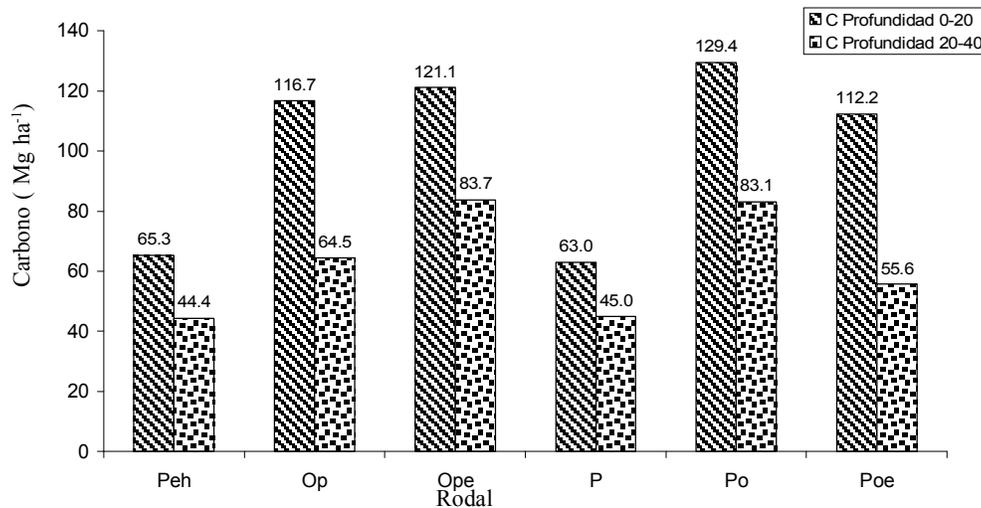


Figura 5. Distribución del carbono en el suelo. Peh = pino-encino-hojosas; Op = oyamel-pino; Ope = oyamel-pino-encino, P = pino, Po = pino-oyamel y Poe = pino-oyamel-encino.

suelo. Van Cleve y Powers (1995) reportan un comportamiento similar en un informe acerca del contenido de MO del suelo en el norte de California y el sureste de Oregon, EE UU.

El suelo es el que aporta la mayor cantidad de C a cada rodal (Figura 5), sumando el contenido de C de las dos profundidades, aproximadamente el 64% del C total de cada rodal proviene del suelo. La cantidad de C que aportó la profundidad 0 a 20 cm al C total, fue de 39.9% y la de 20 a 40 cm fue de 24.7%.

En este estudio, los rodales que presentaron un mayor cantidad de C, sobre todo en los primeros 20 cm, son aquéllos que tenían el componente oyamel; los que no poseen esta especie, ven disminuida la cantidad de C casi en un 50%. Sin embargo, no se puede afirmar que con la sola presencia de oyamel se garantiza una mayor cantidad de C en el suelo, ya que se requeriría medir más rodales en otros ecosistemas para poder afirmarlo.

Como se observa, la cantidad de C es mayor en la profundidad de 0 a 20 cm que en la de 21 a 40 cm, esto es debido a que la mayor actividad microbiana se concentra en las capas superficiales en suelos forestales (Breymer *et al.*, 1996).

Como se puede observar, al realizar una estimación del contenido de C en los diferentes estratos, se puede determinar el potencial de captura por parte del ecosistema estudiado.

CONCLUSIONES

-En el rodal de oyamel-pino se encontró la mayor cantidad de carbono (301.9 Mg ha⁻¹) y la menor en el de pino (183.2 Mg ha⁻¹).

-La mayor cantidad de C se concentró en la parte subterránea, principalmente en los primeros 20 cm, observándose una disminución al aumentar la profundidad del suelo.

-En el estrato aéreo, los que aportaron la mayor cantidad de carbono fueron los árboles. Este factor se relacionó directamente con el área basal. Por lo tanto, el área basal es un buen indicador del contenido de carbono para el estrato arbóreo.

-En todos los rodales, la mayor concentración de carbono de los rodales en la parte aérea se encontró en el estrato arbóreo y varió desde 90.4 hasta 45.6 Mg ha⁻¹.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, J. D. Etchevers-Barra y A. Velásquez-Martínez. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6: 725-736.
- Avery, T. E. and H. E. Burkhart. 1994. *Forest measurements*. McGraw-Hill. New York, NY, USA.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios

- ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 30: 32-35.
- Ben, H. J., B. de Hong, G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor, and R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20: 409-416.
- Breymer, A. I., B. Berg, S. T. Gower, and D. Johnson. 1996. Carbon budget: temperate coniferous forests. pp. 41-67. *In: A. I. Breymer, D. O. Hall, J. M. Melillo, and G. I. Agren. Global change: effects on coniferous forests and grasslands.* John Wiley. Chichester, UK.
- Díaz, F. R., M. M. Acosta, A. F. Carrillo, R. E. Buendía, A. E. Flores y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13: 17-28.
- Estrada, P. M. 1999. El cambio climático y sus efectos. *Revista de Información y Análisis* 8: 45-52.
- Etchevers B., J. D., M. Acosta M., C. Monreal M., C. Hidalgo M., J. Padilla C. y L. Jiménez. 2002. Below-ground (roots and soil) compartments of carbon in forest and agricultural systems on hillsides in Mexico. *In: Soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses.* Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa, ON, CAN.
- Etchevers B., J. D., C. Monreal M., M. Hidalgo C., M. Acosta M., C. J. Padilla y R. R. M López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Figuerola, N. C. M., J. D. Etchevers B., M. A. Velásquez y M. Acosta M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 1: 57-64
- González Ch., M. C., G. R. Carrillo y M. J. Pérez. 2004. Educación ambiental. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Houghton, R. A. and C. M. Woodwell. 1989. Global climate change. *Sci. Am.* 260: 36-40.
- Infante, G. S. 1991. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Trillas. México, D. F.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 2001. Tercer informe de evaluación cambio climático 2001; la base científica. IPCC. Chesterfield, MO, USA.
- Lashof, D. A. and D. R. Ahuja. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344: 529-531.
- Melillo, J. M., D. O. Hall, and G. I. Ågren. 1996. Executive summary. pp.1-16. *In: Global change: effects on coniferous forests and grasslands.* John Wiley. New York, NY, USA.
- Monreal, C. M., B. J. D. Etchevers, M. Acosta, C. Hidalgo, J. Padilla, R. M. López, L. Jiménez, and A. Velásquez. 2005. A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Can. J. Soil Sci.* 85: 523-530.
- Shaver, G. R. and J. D. Aber. 1996. Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. pp. 183-198. *In: Global change: effects on coniferous forests and grasslands.* John Wiley. New York, NY, USA.
- Schlesinger, W. H. 1986. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. pp. 194-220. *In: J. R. Trabalka and D. E. Reichle (eds.). The changing carbon cycle-a global analysis.* Springer-Verlag, New York, NY, USA.
- Schneider, S. H. 1989. The greenhouse affect: science and policy. *Science* 243: 271-281.
- Segura C., M. A., P. Sánchez G., C. A. Ortiz S. y Ma. C. Gutiérrez C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 1: 21-27
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. México II Comunicación Nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio Climático. Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología (INE). SEMARNAT. México, D. F.
- Shimel, D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1: 77-91.
- Torres, R. J. M. y S. A. Guevara. 2005. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Instituto Nacional de Ecología. http://www.ine.gob.mx/veajei/publicaciones/gacetas/63/psp3.html?id_pub=361&id_tema=138_dir=consultas (Consulta: agosto 1, 2008).
- Van Cleve K. and R. F. Powers. 1995. Soil carbon, soil formation, and ecosystem development. pp. 155-199. *In: W.W. McFee and J. M. Kelly, (eds.). Carbon forms and functions in forest soils.* Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.