



Fernando Paz Pellat
Ruth Torres Alamilla
Editores

Serie: Síntesis Nacionales

Programa Mexicano del Carbono

Estado Actual
del Conocimiento
del Ciclo del Carbono
y sus Interacciones en México:
Síntesis a 2017

Programa Mexicano del Carbono
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Universidad Autónoma de Baja California





Forma correcta de citar:

Paz, F. y R. Torres (Editores). 2017. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y la Universidad Autónoma de Baja California. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-5-0. 656 p.

ISBN: 978-607-96490-5-0



Programa Mexicano del Carbono A.C.
Calle Chiconautla No. 8 Interior A
Colonia Lomas de Cristo, Texcoco, Estado de México, México

www.pmcarbono.org

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).
Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2017

Fernando Paz y Ruth Torres

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono.
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
Universidad Autónoma de Baja California.

Ensenada, Baja California

2017

ISBN: 978-607-96490-5-0

ISBN: 978-607-96490-5-0



9 786079 649050

Índice de Revisores

BEN DE JONG

El Colegio de la Frontera Sur

ENRICO YÉPEZ GONZÁLEZ

Instituto Tecnológico de Sonora

FERNANDO PAZ PELLAT

Colegio de Postgraduados

GEORGINA SANDOVAL FABIÁN

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.

GRACIELA ALCALÁ MOYA

Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional

HÉCTOR REYES BONILLA

Universidad Autónoma de Baja California Sur

JORGE ALFREDO HERRERA SILVEIRA

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Instituto Politécnico Nacional

JOSÉ RUBÉN LARA LARA

Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada

JOSÉ TULIO ARREDONDO MORENO

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

JULIO CÉSAR RODRÍGUEZ CASAS

Universidad de Sonora

MARCOS CASIANO DOMÍNGUEZ

Programa Mexicano del Carbono

MARGARET SKUTSCH

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

MARIELA FUENTES PONCE

Universidad Autónoma Metropolitana

MARIO MANZANO CAMARILLO

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

OSCAR BRIONES VILLARREAL

Instituto de Ecología, A.C.

RAMÓN SOSA ÁVALOS

Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima

SAÚL ÁLVAREZ BORREGO

Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada

VINISA SAYNES SANTILLÁN

Colegio de Postgraduados



CONTENIDO

CAPÍTULO 1:	
ATMÓSFERA	17
1.1 Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO ₂ vehicular en Tijuana, Baja California	19
1.2 Modelación de la productividad primaria bruta diaria mediante cámaras digitales y datos climáticos	25
1.3 Producción, consumo y emisión de metano en humedales costeros de Veracruz, México	30
1.4 Chinampas: Consideraciones de manejo para la emisión de CO ₂	36
1.5 Emisiones de gases de efecto invernadero distintos al CO ₂ en cultivos de granos básicos	40
1.6 Actividades antropogénicas y efecto en calidad de aire: Contraste entre áreas verdes y zonas transitadas	46
1.7 Efecto del incremento en temperatura en la dinámica de CO ₂ en suelo del Valle del Yaqui	53
1.8 Desempeño de una manipulación de temperatura en parcelas experimentales de trigo en el Valle del Yaqui	57
1.9 Decrementos de precipitación ¿Afectarán similarmente la respiración del suelo en el bioma de pastizal semiárido con diferentes tipos de cubierta vegetal?	63
CAPÍTULO 2:	
BIOENERGÍA	67
2.1 Comparación del tipo de cultivo en la producción de biodiésel a partir SCO	69
2.2 Alternativas de mitigación de CO ₂ por el uso de leña en Villaflores, Chiapas, México	74
2.3 Caracterización de aceites residuales como materia prima para biodiésel	80

CAPÍTULO 3: DIMENSIÓN SOCIAL 85

- | | | |
|------|--|-----|
| 3.1 | Ecofeminismo y etnoclimatología en la bioseguridad alimentaria basada en maíz nativo: Estrategias locales frente al cambio climático | 87 |
| 3.2 | Paisajes bioculturales ante el cambio climático: Carbono y agrobiodiversidad en cafetales bajo sombra en Chiapas | 94 |
| 3.3 | Modelo de precios hedónicos para la valoración del carbono en la Ciudad de México | 100 |
| 3.4 | Lecciones aprendidas de la Primera Edición de la Escuela de Verano | 108 |
| 3.5 | Pescadoras de la información en Isla Natividad, Baja California Sur | 115 |
| 3.6 | Escenarios de futuro y concepción del riesgo entre pescadores artesanales de Alvarado, Veracruz, México | 118 |
| 3.7 | ¿Está vinculada la disminución de capturas de las pesquerías ribereñas al cambio climático? | 124 |
| 3.8 | Pesquería en Bahía de Agiabampo: Percepción socio-ambiental ante el cambio climático | 130 |
| 3.9 | Red Temática Programa Mexicano del Carbono: Consolidación y logros 2016 - 2017 | 136 |
| 3.10 | Estrategia estatal REDD+ Chiapas: Documento preliminar | 143 |

CAPÍTULO 4: ECOSISTEMAS ACUÁTICOS 151

- | | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Geles oceánicos, carbono orgánico entre particulado y disuelto | 153 |
| 4.2 | Biomasa de los macroinvertebrados bentónicos en el perfil batimétrico de lagos de Montebello, Chiapas, México | 159 |
| 4.3 | Distribución del carbono orgánico particulado en lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México | 166 |
| 4.4 | Lagos del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México: Metabolismo Lacustre | 172 |
| 4.5 | Flujo de CO ₂ océano-atmósfera en la zona de surgencias frente al norte de Sinaloa | 178 |
| 4.6 | Primeras mediciones del carbono inorgánico disuelto frente a Guaymas, Sonora | 184 |



4.7	Variabilidad del carbono inorgánico disuelto frente a Navachiste, Sinaloa, en septiembre del 2016	189
4.8	Carbono orgánico e inorgánico en sedimentos recientes del Golfo de México	195
4.9	Carbono orgánico en sedimentos de la laguna costera El Yucateco, Tabasco, México, procesos de transformación del nitrógeno	201
4.10	Invasión de carbono atmosférico en la frontera meridional de la corriente de California: Últimas tres décadas	207
4.11	Variación espacial de los géneros de foraminíferos bentónicos en una laguna costera del Golfo de California	213
4.12	Almacenes de carbono aéreo de sitios conservados y en proceso de restauración en manglares de Chiapas	218
4.13	Variabilidad de la producción primaria influenciada por procesos oceánicos en las costas de Nayarit	225
4.14	Carbono azul en núcleos sedimentarios de la Laguna Arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo	232
4.15	Productividad Primaria en el Pacífico central mexicano y datos de fitoplancton asociado	239
4.16	Almacenes de carbono en humedales costeros del Pacífico Norte y Península de Yucatán	245
4.17	Cuantificación de carbono en manglares en El Rabón, dentro de la RB Marismas Nacionales, Nayarit	252
4.18	Carbono almacenado en la capa superficial de suelo de dos manglares geográficamente contrastantes	258
4.19	Vegetation responses to temporal variability of climatic drivers: mangroves in the Mexican semiarid region	265
4.20	Extensión y crecimiento esquelético del coral <i>Pocillopora verrucosa</i> en la costa de Colima, México	272
4.21	Efecto de los vientos Santa Ana en la $p\text{CO}_{2w}$ y el FCO_2 al sur de la Corriente de California	278
4.22	Intercambio océano-atmósfera de CO_2 en un ecosistema coralino del Pacífico tropical mexicano	283
4.23	Almacenes de carbono en biomasa aérea de <i>Avicennia germinans</i> en zonas áridas	290
4.24	Desinformación: ¿La principal amenaza de los pastos marinos?	295

4.25	Carbon storage on mangrove and seagrass meadows sediments in the South of Sonora	301
4.26	El papel del pepino de mar en el flujo de carbono orgánico de los sedimentos	307
4.27	Actividad respiratoria de la comunidad microbiana en la corriente de California y Golfo de México	313
4.28	Flujos de CO ₂ aire-mar estimados en el Pacífico oriental tropical mexicano	318
4.29	Assessment of Carbon and Water Use Efficiency of the Ecosystems in the Yucatan Peninsula	324
4.30	Pulsos de carbono asociados a enfriamientos en una bahía al suroeste del Golfo de California	332
4.31	Primeras estimaciones de la biomasa de carbono de diatomeas y dinoflagelados del Golfo de México	340
4.32	Tasas de acumulación de carbono antropogénico en el Golfo de México	346
4.33	Variabilidad de la productividad primaria integrada en Perdido y Coatzacoalcos del Golfo de México (2006-2016)	352
4.34	Balance de Carbono Inorgánico en aguas superficiales del Pacífico Tropical frente a México en verano del 2015	359
4.35	Efecto del río Amazonas en Sistema de CO ₂ en el Caribe Oriental	367
4.36	El papel del sedimento en el control biogeoquímico del sistema de carbono en Bahía San Quintín	374
4.37	Flujos de CO ₂ en Cabo Pulmo (B.C.S.), un arrecife de franja con influencia oceánica	382
4.38	Los pastos marinos como elemento clave en el sistema de carbono de una bahía costera	389
4.39	Monitoreo físico, químico y biológico de arrecifes templados en Baja California	396
4.40	Avances en la medición potenciométrica de la alcalinidad total en agua de mar	402
4.41	Variabilidad temporal del Carbono Inorgánico Disuelto y Oxígeno en el Golfo de México	407
4.42	Lagunas costeras hipersalinas de la Península de Baja California: Un potencial repositorio de carbono no cuantificado	413
4.43	Efecto del pH reducido en el desarrollo temprano del erizo morado <i>Strongylocentrotus purpuratus</i>	418
4.44	Variabilidad y efectos antropogénicos en el pH de tres lagunas costeras en San Diego	425

CAPÍTULO 5: ECOSISTEMAS TERRESTRES 429

5.1	Ecuaciones alométricas preliminares para la estimación de biomasa subterránea en <i>Pinus patula</i>	431
5.2	Pérdida de carbono Orgánico de Suelo por la Conversión de Vegetación Natural a Pastizales, México	438
5.3	Producción y descomposición de hojarasca en una cronosecuencia de selva mediana subperennifolia en Calakmul, Campeche	444
5.4	Control de calidad en el análisis de carbono del suelo: Experiencia de la REDLABS	450
5.5	Impactos del cambio climático en la Productividad Neta de ecosistemas en la región del monzón Norteamericano	455
5.6	Almacén de carbono en encinos en un gradiente altitudinal en Jalisco, México: Avances preliminares	462
5.7	Contenidos de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México	467
5.8	Ecuaciones alométricas para estimar contenido de carbono aéreo en <i>Pinus rudis</i> Endl., en Acajete, Veracruz	473
5.9	Remediación de residuos mineros ácidos con dos biocharres y cal	478
5.10	Costras biológicas y respiración edáfica en un ecosistema árido del noroeste de México	484
5.11	Respiración de suelo en un cultivo de <i>Carya illinoensis</i> y <i>Capsicum annuum</i>	491
5.12	Secuestro de carbono en los sistemas forestales de la zona del volcán La Malinche	496
5.13	Estimación de carbono liberado por los residuos de la transformación primaria de la madera	502
5.14	Evaluation of the Urban Net Ecosystem Exchange across Different Landscapes in Phoenix, Arizona	507
5.15	Labranza de conservación y carbono del suelo en rotaciones maíz-sorgo-soya	512
5.16	Emisión de GEI en la ganadería de Aguascalientes y su contribución al inventario nacional	517
5.17	Almacenes de carbono orgánico aéreo en manglares sometidos a perturbaciones naturales	523

5.18	C y N durante la descomposición de hojarasca en estados sucesionales del bosque tropical seco	529
5.19	Compartimentación del almacenamiento de carbono orgánico en ecosistemas ribereños de alta montaña de México	534
5.20	Estimación de biomasa de árboles individuales de especies arbóreas en bosques tropicales secundarios	540
5.21	Almacén de carbono del matorral xerófilo y del encinar del ANP Ecoguardas, Ciudad de México	547
5.22	Biomasa aérea y radicular de herbáceas, en Nuevo León	553
5.23	Inventario del carbono orgánico del suelo en el estado de Campeche: Una propuesta metodológica	558
5.24	Transferencia de carbono de la hojarasca al suelo en los desiertos mexicanos	565
5.25	Determinación de carbono orgánico en suelos de cultivos de maguey mezcalero en Matatlán, Oaxaca	571
5.26	Carbono y uso del suelo en ambientes riparios de montaña	576
5.27	Almacenamiento de carbono en bancos de forraje de especies leñosas en Yucatán	583
5.28	Susceptibilidad de los suelos y bosques a la deposición ácida en la región Xico-Coatepec, Veracruz	590
5.29	Contribución de las costras biológicas al flujo de CO ₂ en un matorral xerófilo de Sonora	596
5.30	Carbono orgánico total en suelos reforestados con <i>Eucalyptus</i> spp. y <i>Quercus</i> spp., en el Parque Estatal Sierra de Guadalupe, Estado de México	602
5.31	Parametrización de modelos de procesos para el análisis de la dinámica de carbono en bosques	609
5.32	Evaluación de diseños de muestreo para estimar cobertura forestal con fotografías digitales: Una simulación espacial	615
5.33	Differences in soil respiration in wet and dry seasons in a tropical dry forest in Northwestern of México	621
5.34	Patrones geoespaciales en la producción primaria de ecosistemas semiáridos mediante el uso de indicadores fenológicos	627
5.35	Protocolo para identificar costras biológicas costeras y su función en el ciclo del carbono	634



5.36	Diversidad florística y funcional en cafetales de la Sierra Madre de Chiapas	640
5.37	Sistema anidado de actividades agrícolas para la estimación de PSA de carbono en el Estado de México	648

5.8 Ecuaciones alométricas para estimar contenido de carbono aéreo en *Pinus rudis* Endl., en Acajete, Veracruz

Juárez-Gabriel Karla M.¹; Viveros-Viveros Héctor¹; Acosta-Mireles Miguel²; Juárez-Cerrillo Sergio F.³ y Bolívar-Cimé Beatriz del S.¹

¹Instituto de Investigaciones Forestales (INIFOR). Parque Ecológico El Haya, Col. Benito Juárez, CP 91070, Xalapa, Veracruz.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Valle de México. Km13.5 de la Carretera los Reyes-Texcoco, Coatlinchan, CP 56250, Texcoco, Estado de México.

³Facultad de Estadística e Informática. Av. Xalapa esquina. Manuel Ávila Camacho S/N. CP 91020, Xalapa, Veracruz.

Autor para correspondencia: karjugab@gmail.com

Resumen

Se generaron modelos alométricos para estimar el contenido de carbono aéreo en árboles de *Pinus rudis* Endl. en Acajete, Veracruz, a partir de las mediciones del diámetro normal y altura. Se seleccionaron 25 árboles de *P. rudis* y se determinó su biomasa. De cada árbol se obtuvieron muestras de los siguientes componentes estructurales: fuste, ramas y follaje; en campo se determinó el peso fresco, tanto de la muestra de cada árbol como del componente. En laboratorio se obtuvo el peso seco de las muestras, para después estimar la biomasa total de cada árbol, usando para ello la relación peso seco:peso fresco de las muestras. Para determinar el carbono de los diferentes componentes se tomaron muestras de siete árboles y se analizaron en el laboratorio. El contenido de carbono promedio en el fuste y ramas fue de 49.40%, el del follaje de 49.18% y el total del árbol de 49.32%. La ecuación que tuvo un mejor ajuste para determinar el contenido de carbono a partir del diámetro normal fue un modelo no lineal de potencia, mientras que para la altura fue un modelo no lineal exponencial.

Palabras clave: *diámetro normal; altura del arbolado; modelo no lineal.*

Abstract

Allometric models were generated to calculate aerial carbon content in trees of *Pinus rudis* Endl. in Acajete, Veracruz, from the measurement of their normal diameter and height. We selected twenty-five trees of *P. rudis* and determined their biomass. Samples were obtained from each of the following structural components: stem, branches and foliage; fresh weight was determined in samples as well as in each component. Samples were taken to the laboratory to be dried and then weighted. Total biomass of each tree was estimated by the relationship between the dry weight and the fresh weight of the samples. Seven sampled trees were analyzed in the laboratory to determine the carbon content of their components. The mean carbon content was 49.40% in the stems and branches, 49.18% in the foliage and 49.32% in the complete tree. The equation which best fits for calculating the carbon content from the normal diameter was a non-linear model of power, while for height was a non-linear exponential model.

Key words: *normal diameter; tree height; non-linear model.*

Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas más abundante de origen antropogénico en la atmósfera y contribuye con un 76% al calentamiento global, una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa de las plantas (Ávila *et al.*, 2001). El carbono (C) del CO₂ participa mediante la fotosíntesis en la composición de las estructuras del árbol para que este pueda desarrollarse, al formar follaje, ramas y

tronco; de esta forma incrementa volumen y biomasa (Díaz *et al.*, 2007; Figueroa, 2010). Una manera de estimar el porcentaje de carbono acumulado en los árboles es a través de ecuaciones alométricas, las cuales permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono fijado, la tasa de fijación de CO₂ y con ello valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero (Méndez *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2013).

En México se han desarrollado ecuaciones para estimar carbono en coníferas, utilizando variables de fácil medición como el diámetro normal, por ejemplo para *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham en Tlaxcala, México (Avendaño *et al.*, 2009); en áreas reforestadas con *Pinus patula* Schl. et Cham. en Oaxaca, Oaxaca (Pacheco, 2011) y *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en Texcoco, México (Vigil, 2010); en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México (Méndez *et al.*, 2011), en este último caso utilizaron el diámetro normal y la altura. Para *Pinus rudis* Endl. no se han generado ecuaciones que permitan estimar el carbono acumulado en la parte aérea del arbolado, por ello el objetivo del presente trabajo fue generar ecuaciones para estimar el contenido de carbono aéreo de árboles de *Pinus rudis* Endl. utilizando variables de fácil medición como el diámetro normal y la altura total.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el predio denominado Agua del Conejo ubicado dentro de la congregación de Mazatepec, municipio de Acajete, Veracruz, con una altitud de 2987 m s.n.m., latitud 19°32'38.3" N y longitud 97°05'29.1" O (INEGI, 2015).

Muestreo de campo

Se seleccionaron 25 árboles de diferentes categorías diamétricas tratando de abarcar todos los diámetros existentes en los diferentes rodales del predio bajo estudio, se utilizó un muestreo destructivo siguiendo la metodología propuesta por Acosta *et al.* (2002). Antes del derribo, a cada árbol se le midió el diámetro normal a una altura de 1.3 m (DN) (cm), una vez derribado se midió la altura a fuste limpio y altura total (m), cada árbol se separó por componente estructural (follaje-ramillas con acículas, fuste y ramas). El fuste se seccionó en trozas de dimensiones comerciales de 2.55 m, de cada troza se obtuvieron rodajas de aproximadamente 5 cm de grosor, una rodaja de la primera troza (parte inferior del fuste), una de la troza media y una o dos de las últimas trozas (parte superior del fuste). La copa del árbol se seccionó en tres partes con la finalidad de facilitar la separación del follaje-ramillas y ramas, una vez separado, se obtuvieron de dos a tres muestras del follaje-ramillas y ramas por árbol. En campo, se obtuvo el peso fresco de cada componente estructural del árbol, de igual manera de todas las muestras de rodajas, follaje-ramillas y ramas.

Las muestras se trasladaron a un invernadero ubicado en la localidad de Jilotepec, Veracruz donde se colocaron para su secado, las muestras se pesaron hasta obtener un peso constante. Enseguida se tomaron submuestras por componente estructural de aproximadamente 50 g y se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana para su secado en una estufa marca BOEKEL Scientific Modelo 107800 a 60 °C durante 72 h o hasta obtener un peso constante.

Determinación del contenido de carbono aéreo

De los 25 árboles seleccionados para estimar la biomasa se eligieron siete para determinar el porcentaje de carbono aéreo de cada uno de sus componentes. La selección de estos árboles fue

empleando un modelo lineal, donde la variable independiente fue el diámetro normal y la variable dependiente fue el logaritmo de la biomasa de las rodajas. Se utilizaron bandas de predicción del modelo lineal para predecir los valores máximos y mínimos del logaritmo de la biomasa por cada valor del diámetro, eliminando diámetros hasta obtener una banda más ajustada a los valores predichos (Ferrari y Head, 2010). Los análisis estadísticos fueron desarrollados utilizando el paquete estadístico R.

Para medir el carbono aéreo de cada componente, se siguió el procedimiento descrito por Acosta (2003), se tomó aproximadamente 50 g de cada submuestra de rodajas, ramas y follaje-ramillas se astillaron, molieron y tamizaron por una malla 30, posteriormente en el laboratorio de fertilidad de suelos y química ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, se determinó la concentración de carbono total (Ct) de cada submuestra por medio de la digestión seca a 900 °C en el autodeterminador automático de C, TOC SSM 5050A Shimadzu.

Se determinó el contenido de carbono aéreo en la biomasa en los componentes de cada árbol mediante la Expresión 1.

$$CCC = BTC * \%C \quad (1)$$

donde, *CCC* es el contenido de carbono por componente en kg, *BTC* es la biomasa total del componente de cada árbol en kg y *%C* es el porcentaje de carbono del componente determinado en el laboratorio.

Se ajustaron tanto modelos lineales y no lineales de potencia y exponenciales, se estimaron los coeficientes β_0 y β_1 a partir del conjunto de datos del contenido de carbono, diámetro normal y la altura de los árboles (Picard *et al.*, 2012), los ajustes de los modelos se realizaron con el paquete estadístico R.

Resultados y Discusión

El porcentaje de carbono para el fuste varió de 48 a 53.5, con un promedio de 49.4; para las ramas varió de 48.5 a 50.4, con un promedio similar al del fuste y, para el follaje-ramillas varió de 48.8 a 49.4, con un promedio de 49.18. Finalmente el promedio del porcentaje de carbono total del árbol fue de 49.32. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de carbono promedio por componente en *Pinus rudis* Endl.

Componentes	Árbol 4	Árbol 5	Árbol 8	Árbol 11	Árbol 14	Árbol 17	Árbol 19	Promedio	Desv. Est.
Fuste	53.50	49.74	48.70	48.40	48.05	49.05	48.34	49.40	1.89
Follaje	49.23	49.20	49.40	49.30	49.40	48.80	48.90	49.18	0.24
Ramas	49.41	49.60	49.00	50.00	48.90	50.40	48.50	49.40	0.66
Árbol total	50.71	49.51	49.03	49.23	48.78	49.42	48.58	49.32	0.70

Los porcentajes de carbono promedio por componente estructural, encontrados en el presente estudio, se encuentran dentro del rango de valores reportados para otras especies de coníferas (Díaz *et al.*, 2007, Carrillo *et al.*, 2014 y 2016).

Los porcentajes de carbono promedio por componente estructural en *P. rudis* fueron similares a los reportados por Carrillo (2016) en *Pinus hartwegii* (48.2% en el fuste, 49.4% en ramas y follaje 48.5%).

Ecuaciones para estimar el contenido de carbono

La mejor ecuación para estimar el contenido de carbono (CC) en *P. rudis* con base al diámetro normal (DN) fue un modelo no lineal de potencia (Figura 1) y quedó expresada con forma a la Fórmula 2.

$$CC = 0.0153 DN^{2.5909} \quad (2)$$

donde, *CC* es el contenido de carbono en kg, *DN* es el Diámetro normal en cm, $\beta_0 = 0.0153$ y $\beta_1 = 2.5909$.

En la Figura 1 se muestra la relación entre el contenido de carbono aéreo (CC) y el diámetro normal (DN) observándose una tendencia positiva que indica que a mayor diámetro normal mayor contenido de carbono y viceversa; sin embargo esta tendencia no fue lineal ya que llega a un punto en que un aumento de diámetro normal conlleva un incremento considerable en contenido de carbono en la parte aérea de los arboles.

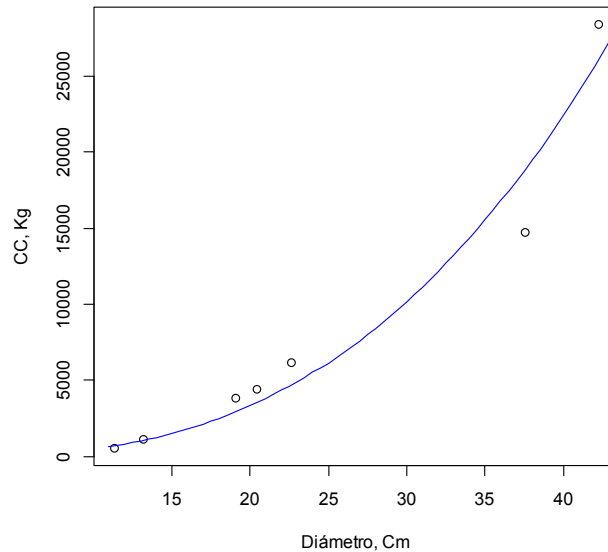


Figura 1. Relación entre el contenido de carbono (CC) y diámetro basal en árboles de *Pinus rudis* en Acajete, Veracruz.

El modelo para estimar el contenido de carbono de la parte aérea de los árboles (CC) en función de la altura de los mismos que mejor se ajustó, fue un modelo no lineal exponencial o de Malthus (Figura 2) y quedó expresado en la Fórmula 3.

$$CC = 0.01497 \exp^{0.51533Alt} \quad (3)$$

donde, CC es el contenido de carbono en kg, Alt es la altura en m, $\beta_0 = 0.01497$ y $\beta_1 = 0.51533$.

En la Figura 2, los resultados muestran que el contenido de carbono a partir de cierta altura se expresa de una forma exponencial y su aumento se ve reflejado considerablemente.

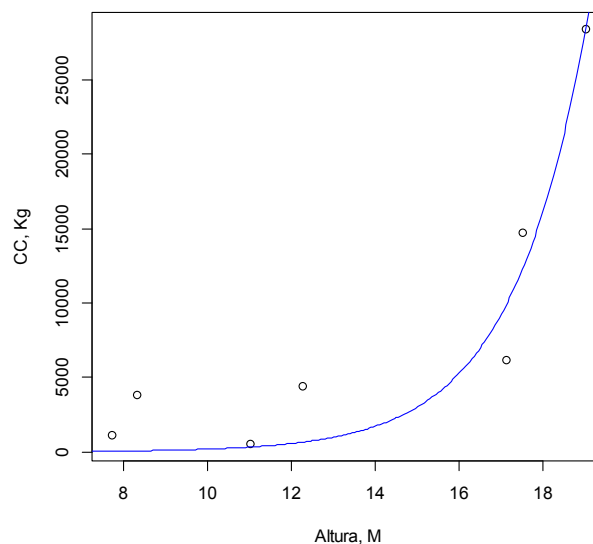


Figura 2. Relación entre el contenido de carbono (CC) y la altura de los árboles de *Pinus rudis*, en Acajete, Veracruz.

En las Figuras 1 y 2 se puede observar que el modelo para estimar el contenido de carbono de la parte aérea de los árboles de *P. rudis* con base en el diámetro normal presentó un mejor ajuste que cuando se utiliza la altura; por lo que resulta más adecuado estimar el contenido de carbono a partir del diámetro normal respecto a utilizar la altura.

Además que la altura es un parámetro más complicado de medir en campo, se comete mayor error y se invierte mayor tiempo en su medición (Moreno *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2014 y 2016).

Conclusiones

El contenido de carbono por componente estructural y en el árbol total fue cercano al 50 %.

El mejor modelo para estimar el contenido de carbono en la parte aérea de árboles de *P. rudis* a partir del diámetro normal, fue un modelo no lineal de potencia mientras que para la altura fue un modelo exponencial. El diámetro normal fue un mejor estimador del contenido de carbono aéreo de los árboles de *P. rudis*.

Literatura citada

- Acosta, M. M., J. Vargas H., A. Velázquez M. y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725–736.
- Acosta, M. M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 135 p.
- Avendaño, H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:233-238.
- 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. *Revista Agroforestería en las Américas* 8:32-35.
- Carrillo, A. F., M. Acosta M., E. Flores A., J. E. Juárez B y E. Bonilla P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15:779-793.
- Carrillo, A. F., M. Acosta M., C. del R. Jiménez C., L. González M. y J. D. Etchevers B. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 681-691.
- Díaz, F. R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13:25-34.
- Ferrari, D. and T. Head. 2010. Regression in R. Part I: Simple Linear Regression. UCLA Department of Statistics Statistical Consulting Center. http://scc.stat.ucla.edu/page_attachments/0000/0139/reg_1.pdf (Consulta: marzo 24, 2017).
- Figuroa, N. C. M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 72 p.
- INEGI. 2015. Información nacional, por entidad y municipios. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. <http://www.inegi.org.mx/> (Consulta: marzo 17, 2017).
- Lim, H., K. H. Lee, K. Lee H and I. H. Park. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research* 18:316–322.
- Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrete., M. A. Capó-Arteaga y J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45:479-491.
- Moreno, G. N., M. A. Herrera M y R. L. Caraciolo F. 2011. Modelo para cálculo estimación del carbono en tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe en la Reserva Nacional Malleco-Chile. *Árvore* 35:1299-1306.
- Pacheco, A. G. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea por compartimientos en reforestaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham en Xiacuí, Ixtlán Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Sierra de Juárez. Oaxaca, México. 58 p.
- Picard, N., L. Saint A. and 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, Rome, Montpellier. 223 p.
- Vigil, N. N. 2010. Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en el campo forestal experimental Las Cruces, Texcoco, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo. Estado de México. 61 p.