



Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares

J. Boone Kauffman

Daniel C. Donato

María Fernanda Adame



Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares

J. Boone Kauffman

Departamento de Pesca y Vida Silvestre EUA, Universidad Estatal de Oregón y CIFOR

Daniel C. Donato

Colegio de Estudios Forestales, Universidad Estatal de Oregón

María Fernanda Adame

Instituto Australiano de Ríos, Universidad de Griffith, Australia

Documento de Trabajo 117

© 2013 Center for International Forestry Research

El contenido de esta publicación se publica bajo una licencia genérica de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada de Creative Commons 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

Kauffman JB, Donato DC y Adame MF. 2013. *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares*. Documento de Trabajo 117. Bogor, Indonesia: CIFOR.

Traducido y actualizado a partir de: Kauffman JB and Donato DC. 2012. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Working Paper 86. Bogor, Indonesia: CIFOR.

Fotografías: MF Adame
Manglares en Celestún, Yucatán.

CIFOR
Jl. CIFOR, Situ Gede
Bogor Barat 16115
Indonesia

T +62 (251) 8622-622
F +62 (251) 8622-100
E cifor@cgiar.org

cifor.org

Queremos dar las gracias a todos los donantes que apoyaron esta investigación con sus contribuciones al Fondo del CGIAR. Para ver una lista completa de los donantes al Fondo, consulte: <https://www.cgiarfund.org/FundDonors>

Cualquier opinión vertida en este documento es de los autores. No refleja necesariamente las opiniones de CIFOR, de las instituciones para las que los autores trabajan o de los financiadores.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Información esencial	3
1.3	Bases conceptuales	4
2	Metodología de campo	12
2.1	Consideraciones únicas para la medición de carbono en manglares	12
2.2	Información general para cada parcela	13
2.3	Mediciones en parcelas y subparcelas	13
3	Trabajo de laboratorio y análisis de datos	22
3.1	Biomasa y reservas de carbono de la vegetación	22
3.2	Reserva de carbono del ecosistema	30
4	Reporte de datos	33
5	Referencias	36

Lista de figuras y tablas

Figuras

1	Diferentes estructuras y tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México	1
2	Neumatóforos de árbol de <i>Sonneratia alba</i> , Yap, Estados Federados de Micronesia	2
3	Reservas de carbono (aéreas y subterráneas) de bosques tropicales en México	2
4	Componentes del ecosistema de manglares para la cuantificación de la biomasa y las reservas de carbono	4
5	Pasos sugeridos para la preparación de un plan de medición de reservas/emisiones de carbono	6
6	Representación esquemática de la distribución de parcelas utilizada en el estudio de manglares en la región del Indo-Pacífico por la Iniciativa del Cambio Climático para la Adaptación y Mitigación en Humedales	7
7	Ejemplos de diseños de muestreo con parcelas para diferentes inventarios forestales	8
8	Distribución de parcelas para determinar las reservas de carbono en manglares dentro de la Reserva Forestal Sundarbans, en Bangladesh	9
9	Distribución recomendada para la medición de las reservas de carbono, composición y estructura de manglares chaparros	9
10	Ejemplo de muestreo al azar en manglares de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, México	10
11	El ciclo de mareas y “La regla de los doceavos” que afecta el tiempo óptimo para muestrear la vegetación y suelos de los manglares	12
12	Midiendo el diámetro de mangles	14
13	Estado de decaimiento de árboles por clases	15
14	Mediciones de campo para determinar la biomasa de manglares chaparros	16
15	Esquema de densitómetro con cuatro puntos en cada cuadro.	16
16	Pastizales asociados a manglares en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México	17
17	Acumulación de madera muerta y caída después de un huracán en manglares de Mahahual, Quintana Roo, México	18
18	Ejemplo de transecto para medir la madera caída en manglares usando la técnica de intersección lineal	19
19	Ejemplo de un transecto (izquierda) para medir la madera muerta de diferentes tamaños (derecha)	19
20	Colecta paso a paso de muestras de sedimento utilizando un nucleador	21
21	Comparación de la biomasa arbórea para dos especies de mangle — <i>Bruguiera gymnorhiza</i> y <i>Sonneratia alba</i> — con diferentes ecuaciones alométricas	25
22	Relación entre la materia orgánica (calculada a través de la pérdida por ignición) y la concentración de carbono (%) calculada a través de combustión seca para el suelo de manglares de la República de Palaos	29
23	Reservas de carbono (Panel A= aéreas; Panel B = subterráneas) de diferentes tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México	33
24	Fotos representativas de diferentes tipos de manglar	34

Tablas

1	Niveles de valoración que pueden ser utilizados para determinar los factores de emisión de carbono	5
2	Tamaños comúnmente usados para dividir la madera muerta	18
3	Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de manglares comúnmente encontrados en el continente Americano	23
4	Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de manglares chaparros	24
5	Ejemplos de densidad de la madera para especies comunes de mangle	24
6	Gravedad específica y diámetro promedio de la madera muerta de diferentes tamaños utilizada para calcular biomasa	26
7	Biomasa de madera muerta ($Mg\ ha^{-1}$) por clase (diámetro en cm) y condición en manglares de Yap, República Federal de Micronesia	28
8	Reservas de carbono para diferentes tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México	30
9	Reservas de carbono en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México	31
10	Ejemplos de reservas de carbono de un ecosistema de manglar divididas en componentes	35

1. Introducción

Los manglares son asociaciones de árboles, arbustos y otras plantas que habitan en las costas tropicales y subtropicales entre las latitudes 25°N y 25°S. Por lo general, la distribución de estos ecosistemas está restringida a la costa, donde las mareas los inundan con frecuencia. Los manglares que se encuentran a la orilla del agua, llamados manglares de franja, son inundados por prácticamente todas las mareas altas. Por otra parte, los manglares de cuenca o manglares chaparros —que se encuentran en zonas internas— son inundados únicamente durante las mareas vivas o durante eventos esporádicos como las marejadas ocasionadas por tormentas tropicales. En zonas cársticas como la Península de Yucatán, algunas áreas de manglar son permanentemente inundadas por agua subterránea.

Existen por lo menos 68 especies de mangle. Su centro de diversidad es la región Indo-Pacífico, donde Giesen *et al.* (2007) registraron 52 especies de mangle y 268 especies que pueden ser encontradas tanto en manglares como en otros ambientes. En el continente americano sólo hay alrededor de 10 especies, de las cuales en México se pueden encontrar al menos cinco: mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) y mangle amarillo (*Rhizophora harrisonii*).

Los manglares presentan una gran variedad de estructuras, que son resultado de la topografía, el sustrato, la latitud y la hidrología. Los manglares han sido clasificados en cuatro grupos según su estructura: 1) manglares de franja; 2) manglares ribereños; 3) manglares de cuenca; y 4) manglares chaparros. Un manglar puede estar formado por arbustos de menos de 1 m de altura (manglar chaparro) o por árboles de decenas de metros de altura (Figura 1). La biomasa o cantidad en materia acumulada en un manglar puede ser de tan sólo 8 Mg ha⁻¹ en manglares chaparros o alcanzar valores > 500 Mg ha⁻¹ en bosques ribereños o de franja (Kauffman y Cole, 2010; Kauffman *et al.*, 2011).

Los mangles poseen adaptaciones únicas que les permiten crecer en ambientes salobres o salinos, en sedimentos generalmente anóxicos (altamente reducidos), donde la perturbación por tormentas



Figura 1. Diferentes estructuras y tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México

Foto: J.B. Kauffman

Nota: El manglar chaparro mide menos de 1 m de altura, mientras que el manglar alto que se observa en la foto alcanza los 10 m de altura.

tropicales es frecuente. Poseen raíces aéreas y neumatóforos que permiten el intercambio gaseoso (Figura 2). Además, en respuesta a las constantes perturbaciones, los mangles han desarrollado la capacidad de rebrotar y colonizar rápidamente áreas disponibles después de una perturbación.

Se estima que el área de cobertura de los manglares en el mundo está entre 14 y 24 millones de hectáreas. Sin embargo, cálculos recientes indican que el valor real se aproxima más al mínimo estimado de 13,8 millones, lo cual está relacionado con la mejora en las técnicas de medición y/o pérdidas asociadas a la deforestación y conversión de zonas de manglar. Las zonas más extensas de manglar se encuentran en Asia, con 6,8 millones de hectáreas, lo que representa entre el 34 y el 42% del total mundial. Indonesia contiene casi el 23% de los manglares del mundo, seguida por África (20%), Norte y Centro América (15%), Oceanía (12%), Sudamérica (11%) y Australia (7%). Los manglares del Sureste de Asia son los más desarrollados y probablemente los más diversos del mundo. El 64% de todos los manglares del mundo se encuentra en 10 países y el 42% se encuentra concentrado en tan sólo cuatro países: Indonesia, Brasil, Australia y México. En México se estima que existen 770 057 hectáreas de manglar (CONABIO 2009), lo cual representa entre el 3 y el 6% de la cobertura mundial.



Figura 2. Neumatóforos de árbol de *Sonneratia alba*, Yap, Estados Federados de Micronesia

Foto: J.B. Kauffman

Los manglares son ecosistemas costeros clave, pues proveen servicios ambientales y funciones ecológicas críticas para los recursos terrestres y marinos. Entre estos servicios están la protección de la costa frente a tormentas y tsunamis, la depuración de aguas, la provisión de recursos madereros, la biodiversidad y hábitat para varias especies en peligro de extinción y la provisión de zonas de reproducción y crianza para especies de importancia pesquera. Hasta un 75% de las especies tropicales de importancia pesquera tienen parte de su ciclo de vida en los ecosistemas de manglar. Estos son sitios activos de intercambio

de materiales (nutrientes y carbono) con ecosistemas adyacentes, tales como pastos marinos y arrecifes de coral. Los manglares también tienen gran importancia por su estética, lo que los hace valiosos para el ecoturismo. Durante siglos, los pueblos indígenas han usado los manglares para obtener madera, medicinas, colorantes, peces y moluscos. Finalmente, los manglares son una de las reservas más grandes de carbono de los trópicos.

Probablemente el servicio ambiental más importante —y menos estudiado— de los manglares es su papel como reservas de carbono. Las reservas de carbono en los manglares son de las más grandes que se han encontrado en cualquier tipo de bosque. Por ejemplo, las reservas de carbono de los manglares asociados a petenes en la Península de Yucatán son más del doble de las reservas en bosques y selvas tropicales de México (Figura 3). Una gran proporción de esta reserva de carbono se encuentra en el subsuelo, ya que los manglares poseen suelos ricos en materia orgánica. Es por ello que si los suelos de los manglares son perturbados, son susceptibles de liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

Hoy en día, los manglares están amenazados por cambios de uso de suelo y por el cambio climático. Las tasas de deforestación y conversión de estos ecosistemas están entre las más altas de los bosques tropicales y exceden por mucho las tasas de otros bosques. La conversión de estas tierras ha resultado en la pérdida de más de 35% de los manglares durante el periodo comprendido entre 1980 y 2000. México tiene una de las tasas de deforestación más altas del

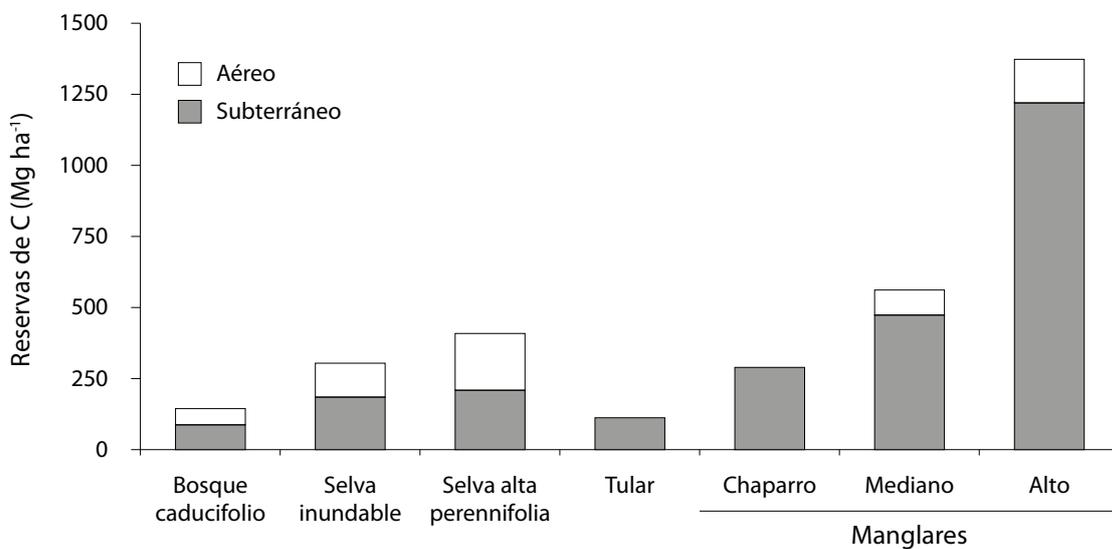


Figura 3. Reservas de carbono (aéreas y subterráneas) de bosques tropicales en México

Fuente: Datos de Jaramillo *et al.* (2003), Hughes *et al.* (1999) y Adame *et al.* (2013)

mundo y pierde en promedio 10 000 hectáreas de manglar por año. Los efectos del cambio climático podrían exacerbar estas pérdidas debido a la elevación del nivel del mar, los cambios en la intensidad de las tormentas tropicales y las modificaciones en los flujos de agua que desembocan en el manglar

Debido a los servicios ambientales que proveen y a las amenazas que sufren, es necesario identificar la composición, estructura y reservas de carbono de los manglares para poder monitorear su estado y tendencia de cambio. Los manglares son un ecosistema de gran interés para las estrategias de mitigación al cambio climático como REDD+ (Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y Degradación) y el aumento de las reservas forestales de carbono en países en desarrollo, entre otros incentivos financieros ligados a la conservación de bosques. REDD+ es un mecanismo que pretende reducir la emisión de gases de efecto invernadero a través de compensaciones a países, a cambio de que estos reduzcan sus tasas de deforestación o degradación. Adicionalmente, REDD+ incluye un marco más amplio de compensaciones por conservación, manejo sustentable o aumento en las reservas de carbono forestales. Debido a su gran capacidad de almacenar carbono, los manglares tienen el potencial de ser ecosistemas clave en este tipo de estrategias.

Los manglares difieren de los bosques terrestres en su composición y estructura. Una de las diferencias más evidentes es la presencia de raíces aéreas y neumatóforos. Además, los manglares por lo general carecen de sotobosque y de capa de hojarasca en el suelo (los cangrejos son altamente eficientes en consumirla). Debido a las grandes diferencias entre los manglares y otros bosques terrestres, las metodologías para cuantificar su composición, estructura y reservas de carbono son diferentes. Anteriormente se han descrito varias metodologías para la medición de bosques terrestres; este manual describe las metodologías para la medición, monitoreo y reporte de la composición, estructura y reservas de carbono de los ecosistemas de manglar con énfasis en los tipos de manglar que se encuentran en México. El muestreo del suelo de los manglares es de especial importancia, ya que es ahí donde se encuentran las mayores reservas de carbono.

1.1 Objetivos

El objetivo de este manual es dar ideas y metodologías para la medición, monitoreo y reporte de la composición, estructura, biomasa aérea y

reservas de carbono de los ecosistemas de manglar. Se describirá con detalle el diseño de muestreo, las mediciones de campo, el análisis y el formato para reportar los resultados. Aun cuando el enfoque son los manglares, también incluimos las bases para monitorear otro tipo de humedales, incluyendo pastos halófilos, tulares y zapotones. Existen métodos para la medición de las reservas de carbono, pero el enfoque de la metodología que aquí se presenta sigue los estándares internacionales establecidos en las guías del Panel Intergubernamental para Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y otras fuentes relevantes. El objetivo de este manual es proveer información en las mediciones de campo y su análisis correspondiente que puedan utilizarse en los mercados regulados y voluntarios de carbono. No se abarcarán mediciones más indirectas como los factores de expansión de biomasa o índices de densidad de árboles. Más bien, el enfoque busca mejorar y hacer disponible la metodología basada en medidas de campo usando ecuaciones alométricas para las estimaciones de biomasa.

El aspecto técnico de la cuantificación del carbono es solo uno de varios elementos requeridos en los esquemas del carbono. Otros elementos importantes son los factores sociales, políticos y económicos (por ejemplo, la permanencia, fugas y gobernanza), que no serán considerados en este manual. Pueden encontrarse definiciones e información sobre estos temas en las guías del IPCC (2007) y fuentes asociadas (por ejemplo, GOF-C-GOLD, 2011).

Otro objetivo de este manual es proporcionar antecedentes generales e instrucciones específicas para la colección y análisis de datos biométricos en manglares. Se incluyen recomendaciones específicas para el diseño experimental, la distribución de los puntos de muestreo y mediciones basadas en la experiencia de los autores en manglares de México, Australia, Pacífico Indico, América Central y el Caribe. Otras metodologías con diferentes tipos, tamaños y número de parcelas también pueden ser adecuadas. Es posible adaptar las metodologías descritas conforme al conocimiento local, capacitación, recursos, necesidades o de acuerdo a la naturaleza cambiante del IPCC y sus guías metodológicas.

1.2 Información esencial

El planteamiento descrito en este manual es relevante para el monitoreo, reporte y verificación de los manglares en proyectos de restauración, adaptación y mitigación. Los proyectos de mitigación incluyen

a los programas de financiamiento tales como REDD+. Los planteamientos para el muestreo de bosques terrestres pueden servir como guía para la implementación y el diseño de proyectos. Algunas de estas guías incluyen información referente a los financiamientos y los mercados de carbono, temas fuera del alcance de este manual. Ejemplos notables son los reportes del IPCC (2003, 2006), Pearson *et al.* (2005, 2007) y GOF-C-GOLD (2011). Para obtener información sobre el establecimiento de parcelas permanentes y otras metodologías relacionadas, se recomienda leer la información otorgada por el Centro de Ciencias Forestales Tropicales (Center for Tropical Forest Science) y la Red del Inventario Forestal de Amazonas (Amazon Forest Inventory Network). Puede encontrarse información sobre ecuaciones alométricas para el análisis de la biomasa arbórea en las revisiones bibliográficas de Komiyama *et al.* (2008) y Saenger (2002).

1.3 Bases conceptuales

1.3.1 Monitoreo de reservas de carbono, deforestación y degradación forestal

Las estimaciones del carbono forestal comprenden el seguimiento de los cambios en las reservas de

carbono como consecuencia de modificaciones en el uso del suelo y la cobertura forestal. Los cambios en las reservas se deben principalmente a deforestación, degradación, conversión y aforestación. Con el fin de cuantificar las reservas de carbono en los manglares, hemos subdividido el ecosistema en componentes que pueden cuantificarse con precisión utilizando técnicas específicas (Figura 4). Las reservas de los manglares pueden dividirse en dos componentes principales: aéreo y subterráneo. Algunos componentes son más importantes que otros para la obtención de medidas precisas de la biomasa forestal y las reservas de carbono del ecosistema. Los componentes de carbono también pueden subdividirse en función de la susceptibilidad de pérdida debido al cambio de uso del suelo o cambios en la densidad forestal. En general, los componentes de carbono más vulnerables son la biomasa aérea y el suelo en los primeros 30 cm de profundidad. Sin embargo, en los suelos orgánicos de los humedales, todo el componente del subsuelo puede ser susceptible a la pérdida debido a las marejadas por tormentas tropicales y a la descomposición acelerada como resultado de cambios de uso del suelo.

Tipos de datos

Los inventarios de carbono requieren dos tipos de datos: actividad y factores de emisión. Los datos

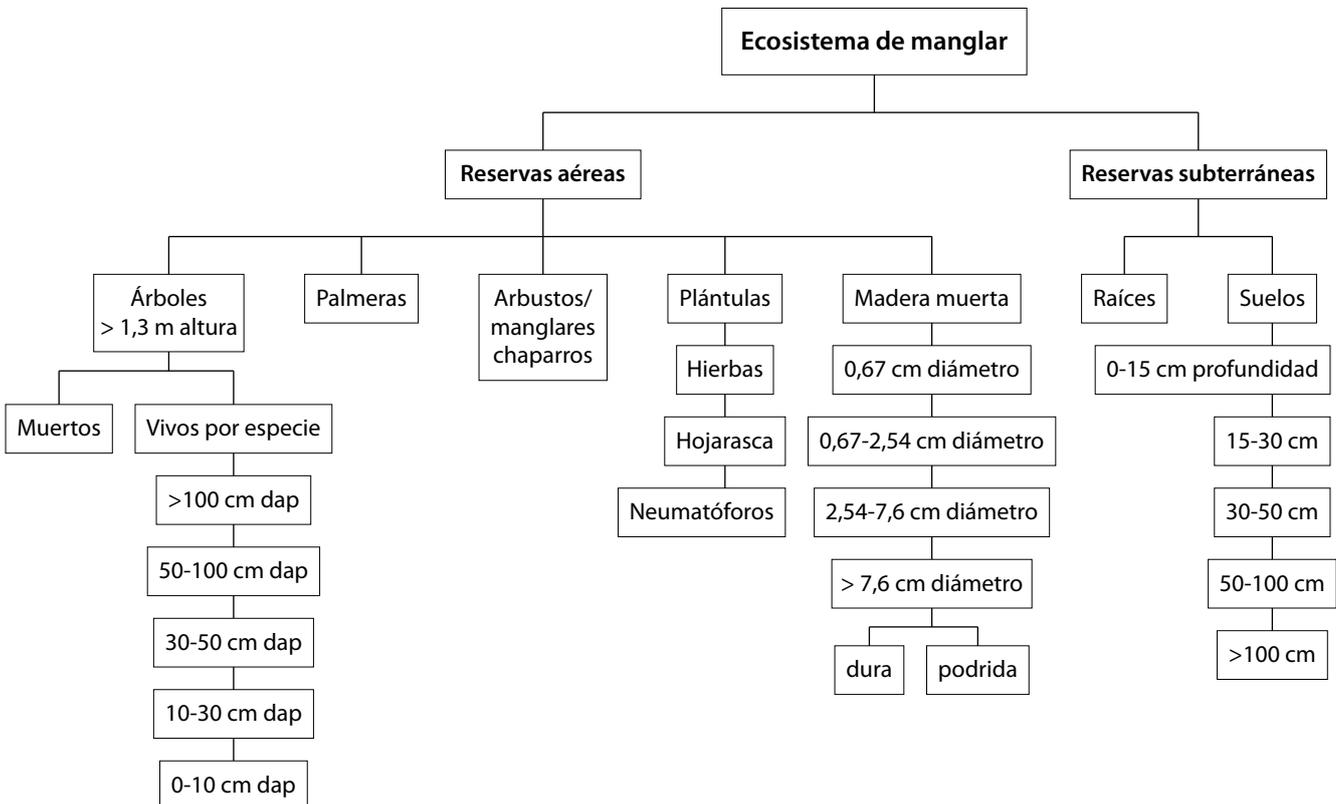


Figura 4. Componentes del ecosistema de manglares para la cuantificación de la biomasa y las reservas de carbono dap=diámetro a la altura del pecho.

de actividad se refieren a los diferentes tipos de uso de suelo del paisaje tales como bosques, tierras de cultivo, pastizales o asentamientos humanos, así como al grado de transferencia entre ellos. Los datos de actividad pueden calcularse a partir de los análisis de imágenes obtenidas a través de técnicas de percepción remota que sirven para clasificar los tipos de uso de suelo y para monitorear los cambios de uso en el tiempo.

Por otra parte, los factores de emisión se refieren a los cambios en las reservas de carbono de un bosque debido a cambios de uso del suelo (por ejemplo, de bosque a tierras de cultivo) o a cambios dentro de un mismo uso del suelo (por ejemplo, degradación forestal debida a la tala selectiva). La cuantificación adecuada de los factores de emisión requiere de medidas de campo de las reservas de carbono. Estos métodos se describen en detalle en este manual.

Niveles de la valoración

Para participar en los programas de REDD+, el IPCC ha establecido un sistema jerárquico que refleja el grado de certidumbre o exactitud de las estimaciones de las reservas de carbono (Tabla 1). El nivel 1 incluye datos obtenidos a partir de valores estándar del IPCC (i.e. biomasa de diferentes tipos de bosques, etc.) y simplificaciones de ciertos supuestos; la estimación puede tener un rango de error de +/- 50% para los componentes de carbono aéreos y +/- 90% para el componente del subsuelo. El nivel 2 requiere de datos de carbono de componentes clave específicos para el país. El nivel 3 requiere de datos altamente específicos como el inventario de las reservas de carbono de diferentes componentes y mediciones continuas en el tiempo. Los datos de nivel 3 pueden o no estar respaldados por modelos matemáticos. Los métodos que se presentan en este manual pueden alcanzar estimaciones de carbono nivel 3.

El IPCC recomienda que los países aspiren a datos de nivel 3 para determinar las reservas, fuentes y

Tabla 1. Niveles de valoración que pueden ser utilizados para determinar los factores de emisión de carbono

Nivel	Requisitos
1	Factores estándar del IPCC
2	Datos específicos por país
3	Inventario detallado de reservas de carbono y mediciones repetidas en el tiempo o a través de modelos

Fuente: Adaptado a partir de GOF-C-GOLD (2011)

sumideros de carbono. Los niveles 2 y 3 producen estimaciones más fiables y pueden resultar en tasas más altas de pagos de carbono que aquellas otorgadas a datos de nivel 1. Sin embargo, obtener datos de nivel 3 es más costoso y, en algunos casos, logísticamente imposible.

Los inventarios forestales de carbono se utilizan para determinar las reservas de carbono en un momento determinado. Las mediciones se repiten a intervalos de tiempo con la finalidad de determinar incrementos o disminuciones en las reservas, es decir, para determinar si dicho bosque es fuente o sumidero de carbono. Existen dos metodologías para determinar dichas variaciones: estimación de cambio y estimación de pérdida-ganancia. La primera metodología consiste en estimar la diferencia entre las reservas de carbono en el tiempo; la segunda consiste en estimar el balance neto entre las adiciones y sustracciones de carbono.

La metodología de la estimación de cambio se utiliza cuando se tienen las reservas de los componentes importantes de carbono y cuando estas reservas han sido monitoreadas en el tiempo (por ejemplo, inventarios forestales). Esta metodología es adecuada para las estimaciones de carbono a nivel 3. La metodología de pérdida-ganancia se utiliza cuando existen tasas de crecimiento, biomasa y datos fiables sobre la tala de árboles. Esta metodología se utiliza frecuentemente para estimaciones a nivel 1 y 2. Sin embargo, puede utilizarse una mezcla de ambas metodologías para cualquier estimación.

1.3.2 Desarrollando un plan

Los pasos para preparar un plan sólido para medir las reservas de carbono se resumen en la Figura 5. Cada uno de los pasos descritos debe realizarse de manera transparente, consistente y justificada. La información detallada de cada paso se muestra a continuación.

Paso 1. Definir los límites del área de estudio

La definición del límite del área de estudio dependerá de la extensión y los objetivos del proyecto. Las áreas de estudio pueden ser desde pequeños manglares hasta estimaciones a nivel nacional. Si el objetivo es amplio, la metodología debe incluir el muestreo de zonas representativas para cada tipo de manglar.

El área de estudio debe estar restringida a las áreas que actual o históricamente estén ocupadas por manglares u otro tipo de humedales costeros. Por lo general, no deben incluirse en las estimaciones zonas de vegetación terrestre, ecosistemas marinos o de agua dulce.

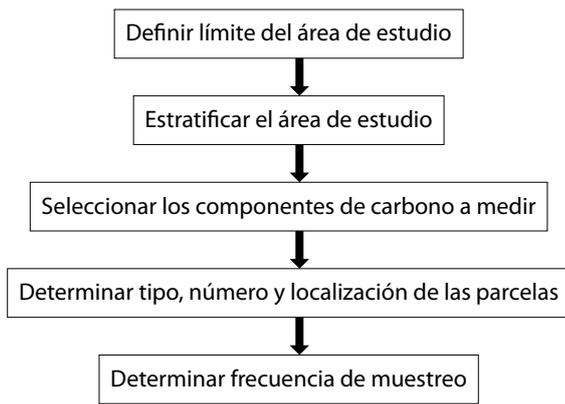


Figura 5. Pasos sugeridos para la preparación de un plan de medición de reservas/emisiones de carbono

Fuente: Pearson *et al.* (2005)

Paso 2. Estratificación del área

Dentro del área del proyecto es común encontrar diferentes tipos y estructuras de manglar (Figura 1). Los manglares suelen estar compuestos por un mosaico de bosques altos, chaparros o incluso de una mezcla con vegetación terrestre. Por ejemplo, en Yucatán, los mangles se mezclan con vegetación de selva en manglares de petén; en Chiapas, los bosques de zapotón se encuentran cerca de los manglares. En tal caso, es recomendable dividir el proyecto en subpoblaciones de manglar que formen áreas relativamente homogéneas. Después de la subdivisión, se deberán muestrear varias parcelas en cada tipo de vegetación. La variación dentro del mismo tipo de vegetación es por lo general baja, por lo que puede utilizarse una menor cantidad de parcelas. Las fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas de vegetación, suelos, y topografía, así como la experiencia en campo son herramientas útiles para definir tales subdivisiones. Asimismo, se recomienda establecer los puntos de muestreo de forma tal que se incluya un gradiente desde la costa hasta los límites terrestres. Cambios pequeños en la elevación topográfica pueden resultar en variaciones importantes en la frecuencia de la inundación de la marea, lo cual resulta en variaciones en la composición del bosque, la biomasa de los árboles, la profundidad del suelo y, por lo tanto, en las reservas de carbono. Por ello, deben tomarse en cuenta las diferencias en los tipos de vegetación debido a cambios topográficos a la hora de seleccionar las categorías de estratificación.

Paso 3. Elegir los componentes más importantes de la reserva de carbono

Los manglares pueden ser divididos en cinco componentes: 1) vegetación aérea; 2) biomasa

subterránea; 3) madera muerta; 4) hojarasca; y 5) suelo. Cada componente deberá ser incluido y medido si este: 1) es considerablemente grande; 2) es afectado por el uso del suelo; 3) el futuro uso del suelo es incierto; y/o 4) el tamaño del componente es incierto. Los componentes de carbono pequeños o aquellos menos susceptibles a ser afectados por cambios de uso del suelo pueden excluirse o muestrearse con menor frecuencia. En los manglares, la vegetación no arbórea y la hojarasca suelen tener poca importancia y frecuentemente pueden excluirse del análisis.

Los árboles siempre deben ser incluidos ya que son relativamente fáciles de muestrear, su biomasa puede calcularse de manera eficiente con ecuaciones alométricas y son fuertemente afectados por el cambio de uso del suelo. La madera muerta es por lo general un componente importante en las reservas de los manglares, en especial después de perturbaciones como cambios de uso de suelo o tormentas tropicales. Muchos manglares tienen suelos ricos en materia orgánica con grandes cantidades de carbono. Debido a su gran importancia y a su alta vulnerabilidad, los suelos son un componente importante y poco estudiado que siempre debe ser considerado en el muestreo.

Paso 4. Determinar tipo, número y localización de parcelas

Tipo

Las parcelas pueden ser temporales o permanentes, dependiendo del estudio. Las parcelas permanentes se utilizan con el objetivo de hacer mediciones en el tiempo. En las parcelas permanentes, los límites suelen estar claramente marcados y todos los árboles dentro de ellas están identificados (generalmente con placas de aluminio). La madera muerta y otros tipos de vegetación (no mangles) pueden marcarse también. Pearson *et al.* (2005, 2007) proveen revisiones bibliográficas sobre las metodologías utilizadas para monitorear árboles marcados. En parcelas temporales los árboles no se marcan. Por lo general, las parcelas temporales se utilizan cuando el objetivo es medir en un punto en el tiempo la composición, la estructura y las reservas de carbono del bosque. Las parcelas permanentes se usan para determinar el cambio de las reservas de carbono en el tiempo. En las figuras 6-9 se muestran ejemplos de diseños de parcelas permanentes para manglares.

La Figura 6 muestra la distribución de parcelas en manglares en un estudio en el Indo-Pacífico y en el reporte Iniciativa para la Adaptación y Mitigación al

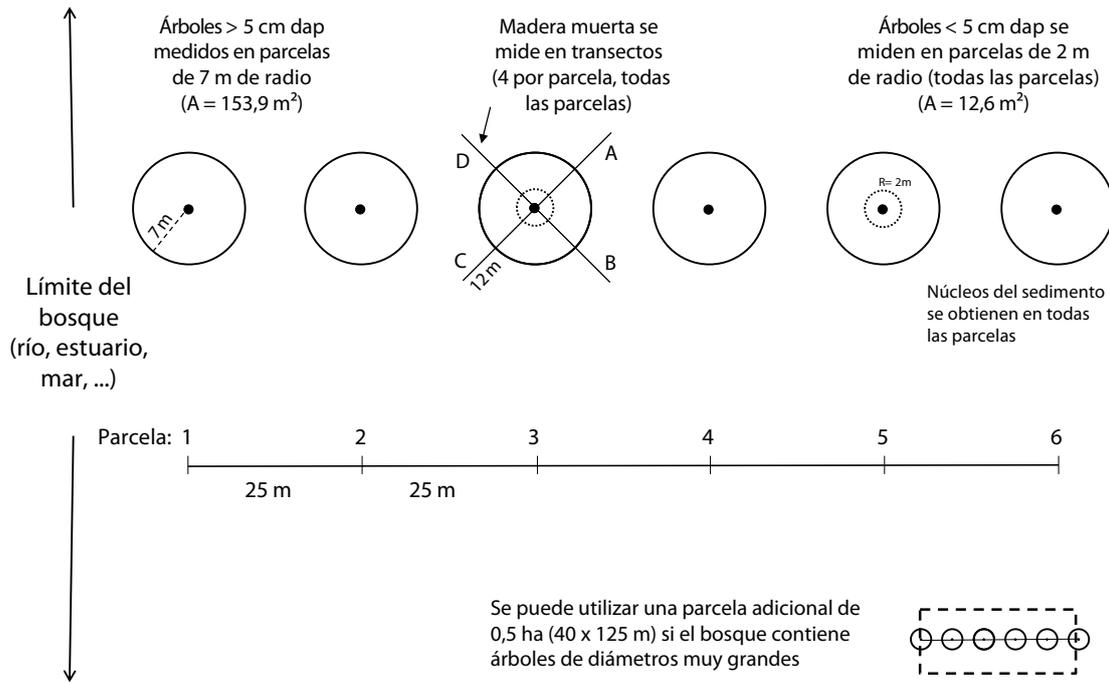


Figura 6. Representación esquemática de la distribución de parcelas utilizada en el estudio de manglares en la región del Indo-Pacífico por la Iniciativa del Cambio Climático para la Adaptación y Mitigación en Humedales (*Tropical Wetlands Initiative for Climate Change Adaptation and Mitigation*). dap= diámetro a la altura del pecho

Cambio Climático en Humedales Tropicales (*Tropical Wetlands Initiative for Climate Change Adaptation and Mitigation*; J.B. Kauffman y D. Murdiyarso, com. pers.). En este diseño se establecen parcelas circulares en un gradiente desde el mar hasta el límite terrestre. La primera parcela se establece a 15 metros de la costa. Este diseño permite una buena estimación de la composición, la estructura y las reservas de carbono de los manglares, además de incluir la variabilidad de la vegetación debido a la elevación topográfica y la frecuencia de inundación de la marea. El diseño lineal permite incluir muchas de las variaciones que existen en un manglar, desde el mar hasta la zona terrestre. Las parcelas circulares son relativamente fáciles de establecer y de medir. Están diseñadas de tal forma que los árboles más grandes (vivos o muertos) se miden dentro de un radio de 7 metros, mientras que árboles pequeños y plántulas se miden en subparcelas de 2 metros de radio. La madera muerta y los detritos se miden en cuatro transectos transversales en cada parcela. Finalmente, las muestras de suelo (profundidad, densidad y concentración de carbono) se colectan a diferentes profundidades cerca del centro de cada parcela. Si existen muchos árboles grandes (por ejemplo, mayores a 50 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP)) estos pueden medirse en una parcela adicional de forma rectangular de

40 x 125 m (0,5 ha) que rodee a todas las parcelas muestreadas (véase figura 6).

Forma y tamaño

Las parcelas para describir la composición, biomasa y reservas de carbono pueden ser de varias formas y tamaños. No existe un tipo o tamaño de parcela óptimo para todos los casos. Por ello, recomendamos el uso de un diseño anidado de parcelas como el que se muestra en la figura 6, donde los árboles grandes se miden dentro de la parcela más grande y los árboles pequeños (i.e. < 5 cm DAP) se miden en subparcelas más pequeñas. El diseño de parcelas que se muestra en las figuras 6-9 puede modificarse para optimizar la medición de los manglares en cualquier estudio y pueden obtenerse datos confiables tanto de parcelas circulares como rectangulares. El objetivo del diseño de parcelas es alcanzar la forma, tamaño e intensidad de muestreo óptimos para describir con exactitud las características del ecosistema sin incurrir en redundancias. Por lo tanto, el tamaño de las parcelas —así como su establecimiento y la frecuencia de medición— debe estar diseñado pensando en la exactitud de los datos, la eficiencia del muestreo y la seguridad de aquellos que participan en el muestreo de campo. La mayoría de los inventarios de reservas de carbono están diseñados en forma de series de

parcelas anidadas, con tamaños correspondientes a la escala espacial de los componentes de interés del bosque; por ejemplo, los árboles más grandes son raros y requieren parcelas más grandes (Figura 6-9). Para muestrear bosques con alta densidad de árboles pequeños, así como de lianas y palmeras, es práctico utilizar parcelas más pequeñas o series de parcelas. Hojarasca, plántulas y hierbas pueden muestrearse de manera adecuada en parcelas incluso más pequeñas.

Distribución

Varios programas de inventarios forestales bien consolidados, tales como el Programa de Análisis e Inventario Forestal de los Estados Unidos (*United States Forest Inventory and Analysis*; FIA), establecen parcelas agrupadas (Figura 7). Debido a la dispersión de las parcelas, este diseño incluye gran parte de la variación intraespecífica de cada sitio (vegetación, suelo, etc.). Por ello, este diseño permite la disminución de la variación interparcela y el aumento de la precisión en las mediciones.

Moverse entre parcelas de manglar es difícil debido a los neumatóforos, el lodo, los canales profundos de agua y la alta densidad de la vegetación. Es importante considerar estas características del ecosistema en el diseño del muestreo. Por ello, Kauffman y Cole (2010) y Donato *et al.* (2011) utilizaron un diseño de parcelas linealmente distribuidas (Figura 6, 7c y 9) en sus mediciones de reservas de carbono. Este diseño facilita el movimiento entre parcelas, disminuye la

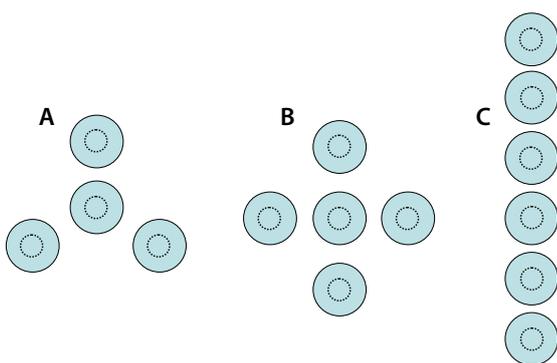


Figura 7. Ejemplos de diseños de muestreo con parcelas para diferentes inventarios forestales

Notas: Cada parcela se compone de varias subparcelas. Los diseños A y B se utilizan en el Análisis e Inventario Forestal de los Estados Unidos (FIA), el Monitoreo para Bosques Saludables (*Forest Health Monitoring*, FHM) y el Programa de Monitoreo de Vegetación (*Current Vegetation Survey*, CVS). Estos diseños se utilizan para incrementar la precisión y el área de muestreo. El diseño C se utilizó en el estudio de carbono del Indo-Pacífico (Donato *et al.*, 2011), la Península de Yucatán (Adame *et al.*, 2013) y Chiapas. Este diseño se utiliza para medición precisa en ambientes con gradientes lineales.

perturbación del suelo e incluye la variación específica de cada zona de muestreo. Además, los diseños lineales se establecen con mayor facilidad.

En la figura 9 podemos observar la distribución de las parcelas para medir manglares chaparros. Los manglares de este tipo pueden ser extremadamente densos; llegan a tener hasta 40 000 árboles por hectárea, por lo que pueden muestrearse en parcelas más pequeñas. La biomasa aérea de los manglares chaparros puede calcularse usando parcelas semicirculares de 2 metros de radio (6,3 m²). Debido a la uniformidad de este tipo de manglar, la distancia entre las parcelas puede acortarse, facilitando el movimiento dentro de este matorral denso. La madera muerta y los suelos pueden medirse utilizando técnicas similares a las usadas en otros tipos de manglar (Figura 6).

Número de sitios y parcelas

Es importante diseñar el muestreo de cada sitio con rigor estadístico. El número de parcelas utilizadas deberá determinarse con el nivel de precisión esperado. Esta precisión está generalmente basada en el conocimiento local y la experiencia, así como en pruebas estadísticas sencillas. Una herramienta en línea útil para calcular el número de parcelas es <http://www.winrock.org/Ecosystems/tools.asp> (Winrock International 2011).

Normalmente se requiere que la precisión del muestreo esté dentro del 10% del valor real de la media, con 95% de nivel de confianza. Para estimar el número de parcelas que se necesitan para obtener esta precisión debe tenerse conocimiento previo sobre la variación de las reservas de carbono en el área (por ejemplo, de un inventario previo o de un muestreo preliminar de 6 -10 parcelas).

De forma sencilla, el número de parcelas que se requieren deberá calcularse de la siguiente manera:

$$\text{Número mínimo de parcelas (n)} = ((t*s)/ E)^2$$

n = número de parcelas

t = estadístico de la distribución t para el intervalo de confianza de 95%, t es generalmente 2, ya que en este momento el tamaño de muestra es desconocido

s = desviación estándar esperada o conocida de datos previos o iniciales

E = error admisible en la primera mitad del intervalo de confianza, obtenido de multiplicar el promedio de la reserva de carbono por la precisión deseada, i.e. * 0,1 (precisión de 10%).

Si el área de estudio se divide en diferentes tipos de manglar, deberá calcularse el número de parcelas para cada tipo. Finalmente, el número mínimo de parcelas deberá incrementarse en un 10% para cubrir aquellas que no pueden ser localizadas o datos perdidos debido a situaciones inesperadas.

Localización

Es importante evitar la parcialidad al seleccionar la localización de los puntos de muestreo. La localización de las parcelas deberá hacerse sin conocimiento previo de la composición y estructura del bosque. Esto puede lograrse eligiendo la localización de las parcelas antes de llegar al campo, seleccionándolas al azar o sistemáticamente (Figura 10). Ambas metodologías son aceptables y suelen dar resultados de igual precisión. Sin embargo, si se sospecha que algunas partes del área de estudio

tienen más carbono que otras, la selección sistemática suele dar como resultado datos de mayor precisión que los obtenidos mediante la selección al azar. El muestreo sistemático es ampliamente reconocido como fiable y válido (Pearson *et al.*, 2007).

Paso 5. Determinación de la frecuencia de muestreo

La determinación de la frecuencia del muestreo dependerá tanto del objetivo del estudio como de la tasa de cambio esperada en los manglares muestreados. Las causas de cambio en manglares son numerosas y sus impactos son variables. Las causas de cambio de las reservas de carbono incluyen perturbaciones naturales como huracanes, cambios en la tasa de secuestro de carbono, cambios en el uso del suelo (por ejemplo, establecimiento de acuacultura) y alteraciones debido al cambio climático (por

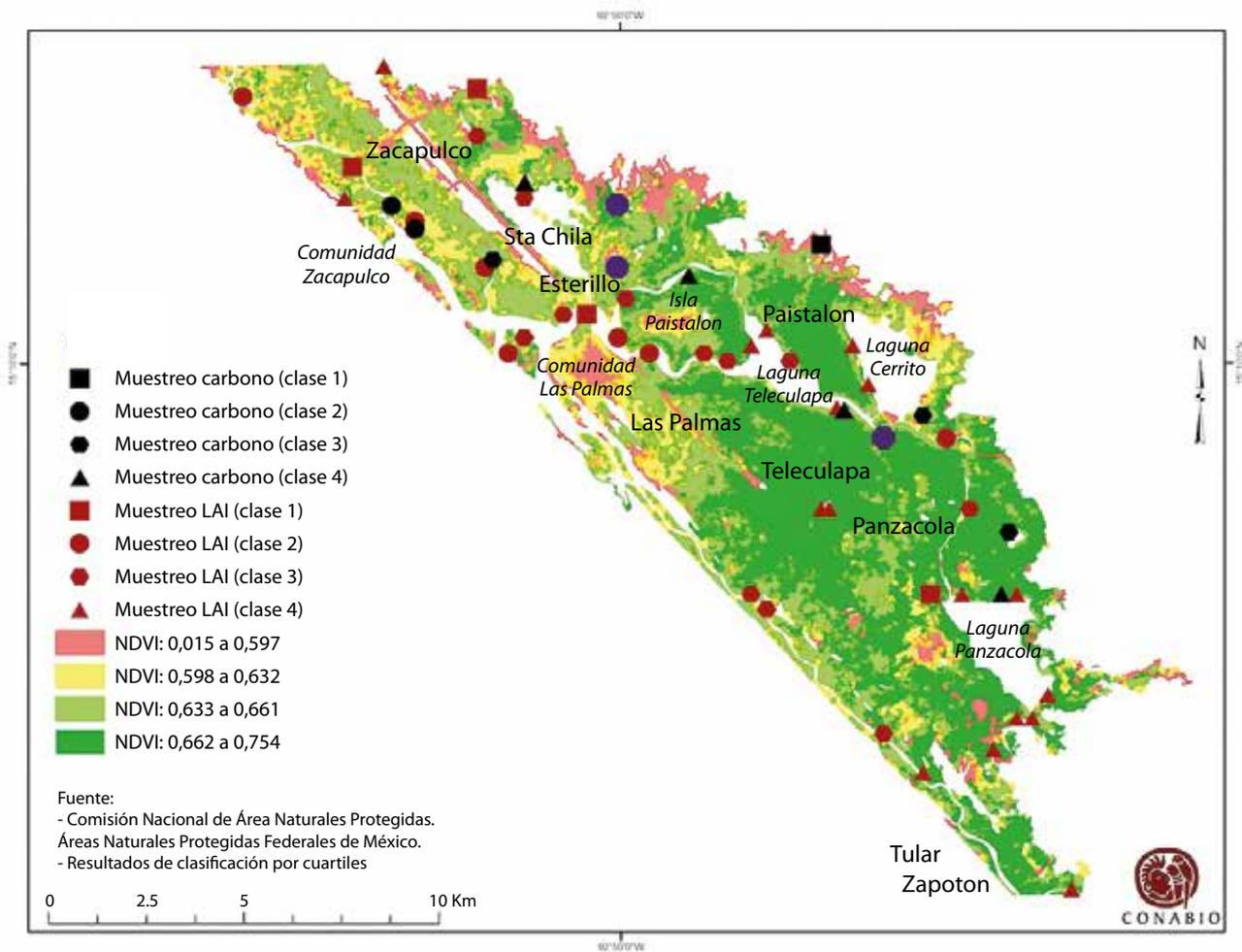


Figura 10. Ejemplo de muestreo al azar en manglares de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, México. Los puntos de muestreo se seleccionaron al azar, con la condición de que estuvieran a menos de 100 metros de una zona de acceso (canal de agua, camino, etc.).

Mapa de A. Vazquez y C. Troche, CONABIO

ejemplo, elevación del nivel del mar). La frecuencia del muestreo también puede determinarse de acuerdo con los requisitos establecidos para la participación en los mercados de carbono.

La frecuencia con la que se realiza el monitoreo deberá determinarse considerando el costo-beneficio de realizar un muestreo. Muestrear frecuentemente (i.e. cada año) dará las mejores estimaciones; sin embargo, los muestreos frecuentes son costosos y probablemente sean más de lo requerido para percibir cambios importantes. Debido a la dinámica de los procesos de captura y emisión, los bosques por lo general se miden en intervalos de aproximadamente 5 años. Las reservas de carbono responden más

lentamente. Para la medición de suelos pueden utilizarse periodos todavía más largos –cada 10 o 20 años. Una desventaja de los muestreos de baja frecuencia es el riesgo de perder información en caso de perturbaciones naturales o antrópicas inesperadas. Este problema es especialmente importante en manglares con suelos orgánicos donde el cambio en la cobertura vegetal podría dar como resultado cambios rápidos en las reservas de carbono del suelo. De la misma forma, eventos inesperados como huracanes (o cambios drásticos del suelo por intervención antrópica) pueden justificar el muestreo a intervalos más cortos. Finalmente, es importante considerar que podría ser necesario hacer mediciones cada 5 años para solicitar créditos en el mercado de carbono.

2. Metodología de campo

2.1 Consideraciones únicas para la medición de carbono en manglares

Los manglares tienen varias propiedades únicas que hay que considerar al diseñar un estudio para la determinación de su estructura y reservas de carbono. Por lo general, los manglares tienen alta densidad de árboles con abundantes raíces aéreas o neumatóforos (Figura 2). Además, los manglares suelen estar divididos por canales de agua inundados durante las mareas que son difíciles de cruzar, especialmente durante la marea alta. Estos y otros peligros limitan la movilidad dentro del bosque y disminuyen la seguridad de los participantes en los muestreos de campo.

Los manglares están sujetos a ciclos de marea y la mayoría sólo pueden ser muestreados durante la marea baja. Por esta razón, el tiempo para muestrear el suelo de los manglares puede estar limitado por la inundación de la marea. Esta limitación es más importante en zonas del país con amplitud alta de marea (por ejemplo, en el Golfo de California la amplitud es superior a 1 metro; en el Pacífico,

entre 0,5 y 1 metro) que en zonas donde el rango de la marea es muy bajo (por ejemplo, en el Golfo de México es de 30 a 40 cm; en el Caribe es inferior a 10 cm). Algunos manglares sólo pueden muestrearse cuando la marea es muy baja por periodos cortos de tiempo (3-4 horas). Es por esto que se requieren métodos eficientes para trabajar en el campo que consideren las variaciones de la marea.

Puede utilizarse la “Regla de los doceavos” para determinar el tiempo disponible para muestrear (Figura 11). El nivel del agua de un ciclo de marea cambia predeciblemente de una forma no lineal:

- Durante la primera hora después de la marea alta, la marea baja $1/12$ de su altura total
- Durante la segunda hora, baja $2/12$ más
- Durante la tercera hora, baja $3/12$ más
- Durante la cuarta hora, baja $3/12$ más
- Durante la quinta hora, baja $2/12$ más
- Durante la sexta hora, baja $1/12$ más
- Este patrón se repite de forma similar durante la creciente de la marea.

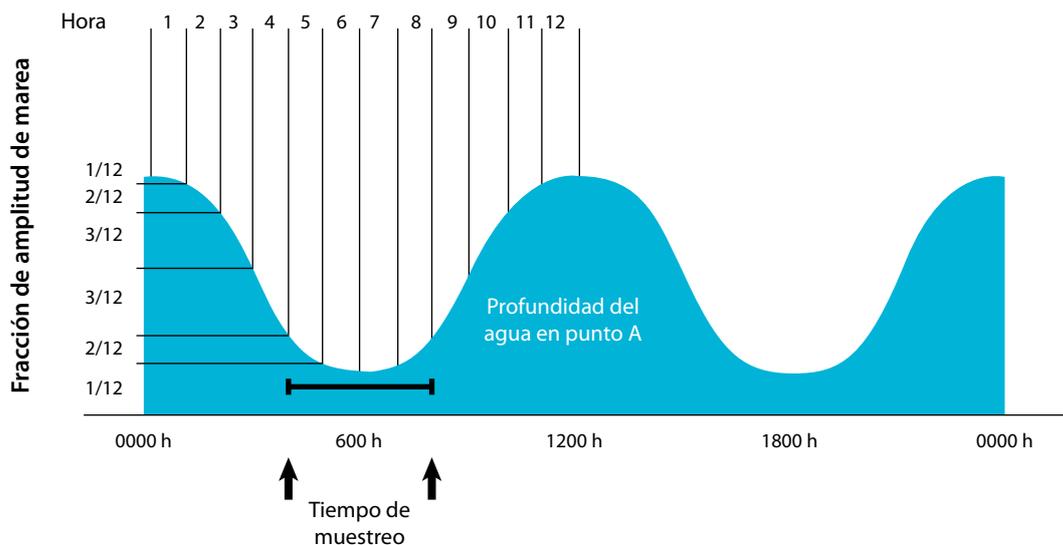


Figura 11. El ciclo de mareas y “La regla de los doceavos” que afecta el tiempo óptimo para muestrear la vegetación y suelos de los manglares

Nota: La marea alta ocurre aproximadamente a las horas 0 y 12; la marea baja a las 6. El periodo de cambio mínimo del nivel del agua ocurre 2 horas antes y después de la marea baja, creando una ventana de tiempo de muestreo de 4 horas, de la hora 4 a la 8. La ventana de tiempo de muestreo puede ser más larga dependiendo de la amplitud de la marea.

2.2 Información general para cada parcela

Deberá recopilarse la siguiente información en cada parcela:

- Número y/o nombre que identifique al sitio y a la parcela muestreada.
- Ubicación del sitio y/o parcela y otra información general (por ejemplo, estado, municipio).
- Fecha.
- Nombre de personas muestreando.
- Coordenadas de GPS y precisión ($\pm X$ m).

También debe tomarse la siguiente información en cada parcela:

- Tipo de vegetación: franja, chaparro (menos de 2 metros de altura) u otro (por ejemplo, pastos halófilos).
- Condición: intacto, degradado, deforestado.
- Topografía: depresión, plano, montículo, etc.
- Geomorfología: delta de río, franja costera, cuenca, etc.
- Descripción del suelo: suelo orgánico, mineral; arena, arcilla, limo.
- Evidencia de perturbación:
 - Afectado por huracán u otro tipo de tormenta tropical: no evidente, bajo, moderado o grave.
 - Extracción de madera: no evidente, baja (menos de 30% del área basal), media (entre 30 y 70% del área basal) o alta (más de 70%). También describir el tipo de extracción.
 - Enfermedades o perturbaciones en la vegetación: no evidente, baja, moderada o grave.

Adicionalmente pueden establecerse puntos permanentes de los cuales se obtiene una fotografía. Deben establecerse protocolos para que todos los muestreos sean consistentes. Por ejemplo, en el inventario de Sundarbans, Bangladesh, se tomaron cuatro fotos digitales —una en cada dirección cardinal (norte, sur, este, oeste)— desde el centro de la parcela. Las fotos deberán guardarse electrónicamente junto con el resto de los datos. Es importante hacer copias de seguridad de estas fotos y de los datos tomados.

Al final de cada salida de campo hay que revisar las hojas de datos originales para verificar su legibilidad y precisión. El encargado de guardar los datos deberá escribir su nombre y la fecha de revisión, junto con notas sobre cualquier incidente durante la jornada. De la misma forma, al pasar los datos a

la computadora, deberá compararse cada hoja con la original. El encargado de pasar los datos deberá escribir su nombre y la fecha en cada hoja de datos. Es necesario registrar todos los incidentes para poder corregirlos en un futuro si es posible. Asimismo, una persona distinta a la que registró los datos deberá comparar una muestra de las hojas de datos con los datos en la computadora (deberá revisarse un mínimo del 10% de las hojas; la cantidad de hojas dependerá del plan de control de calidad y de la cantidad de errores encontrados: mayor cantidad de errores significará una revisión de datos más minuciosa). El revisor de los datos deberá escribir su nombre y la fecha de revisión, así como las notas en los errores encontrados y las correcciones que se hicieron. Es importante dar a conocer todos los errores e inconsistencias al jefe del proyecto para poder tomar las medidas correctivas correspondientes.

2.3 Mediciones en parcelas y subparcelas

2.3.1 Árboles

Los árboles dominan la reserva de carbono de la zona y son un indicador evidente del cambio de uso del suelo y de la condición ecológica del manglar. Es esencial que la medición de los árboles se realice de forma correcta y precisa. El concepto básico es que la medición del diámetro del árbol a la altura del pecho (y en algunas ocasiones su altura) se utiliza para estimar la biomasa del árbol y su reserva de carbono usando ecuaciones alométricas para cada especie (este tema se discute en detalle en la sección “Laboratorio y análisis de datos”).

Los datos básicos que hay que registrar en cualquier monitoreo de manglar son: la identificación de la especie, el diámetro del tronco principal y si el árbol en cuestión está vivo o muerto. Por lo general, el diámetro del tronco se mide a 1,37 metros del suelo o, como se le conoce comúnmente, a la altura del pecho (DAP). Como en todos los bosques, en ocasiones no es sencillo determinar la altura adecuada de la medición debido a estructuras inusuales del tronco. Para árboles con raíces contrafuerte que exceden 1,37 metros de altura o árboles con raíces aéreas (e.g. *Rhizophora mangle*), el DAP se mide por encima de la raíz más alta. Para individuos con raíces que llegan hasta la copa del árbol, no es necesario o práctico medir arriba de la raíz más alta; en estos casos se debe medir por encima de las raíces aéreas donde se encuentre un tronco verdadero. En mangles chaparros menores a 1 metro de altura, el diámetro

se puede medir a 30 cm del suelo (D_{30}). En parcelas permanentes, es importante marcar el punto de medición cuando no sea 1,37 metros sobre el suelo (DAP), poniendo la placa de aluminio exactamente donde se realizó la medida y/o pintando la circunferencia. Todos los árboles que tengan más del 50% de su tronco principal dentro del diámetro de la parcela deberán ser medidos. Los diámetros se miden por lo general con una cinta diamétrica (Figura 12).

Algunos estudios en bosques terrestres sólo incluyen árboles con un DAP superior a 10 cm, debido a que los árboles pequeños generalmente constituyen una porción insignificante de la reserva de carbono del ecosistema. Sin embargo, en muchos manglares, los árboles pequeños pueden dominar la composición arbórea. En parcelas permanentes donde se monitorean las pérdidas y ganancias de carbono, es importante medir todos los árboles. Como se explicó previamente, pueden medirse diámetros menores en subparcelas pequeñas con la finalidad de maximizar la eficiencia del muestreo sin comprometer la precisión de los datos (Figuras 6-9).



Figura 12. Midiendo el diámetro de mangles

Foto M. F. Adame

Notas: La medición de árboles de *Rhizophora mangle* en la Reserva de la Biosfera la Encrucijada se realizó con una cinta diamétrica a 30 cm sobre la raíz aérea más alta.

En manglares, los árboles jóvenes de altura inferior a 1,37 metros se definen como plántulas. Por lo general, las plántulas se cuentan y miden en subparcelas más pequeñas. Las plántulas vivas pueden registrarse como individuos y su biomasa a nivel de parcela puede calcularse como el promedio de la biomasa seca de un número de individuos registrados. Para realizar este cálculo, es necesario cosechar una muestra aleatoria de plántulas tomadas fuera de las parcelas de estudio. Las plántulas se secan y se obtiene la masa en seco. La biomasa de las plántulas se calcula multiplicando la densidad de individuos por la biomasa promedio.

Los árboles muertos en pie deben registrarse como tales. La medición de los árboles muertos en pie es similar a la de árboles vivos. Adicionalmente, debe registrarse el estado de descomposición de cada árbol de acuerdo con el siguiente criterio (Figura 13):

- Estado 1: el árbol conserva ramas terciarias (delgadas) y asemeja a un árbol vivo sin hojas. La biomasa de un árbol muerto en estado 1 puede calcularse usando la ecuación alométrica de la biomasa total menos la biomasa de las hojas.
- Estado 2: el árbol conserva la mayoría de las ramas secundarias (medianas) y primarias (gruesas). La biomasa de un árbol muerto en estado 2 puede calcularse usando la ecuación alométrica de la biomasa del tallo más la biomasa de las ramas y, en caso de *R. mangle*, de las raíces aéreas.
- Estado 3: el árbol tiene pocas o ninguna rama. Asemeja a un tronco que puede o no estar roto en la punta. El cálculo de la biomasa de un árbol en estado 3 puede hacerse utilizando la ecuación alométrica de la biomasa del tallo principal.

En algunos manglares existen lianas, sobre todo en manglares ribereños adyacentes a selvas o en humedales de agua dulce como los zapotones. Las lianas pueden medirse de la misma forma que los árboles utilizando metodologías como las descritas por Gerwing *et al.* (2006) y Schnitzer *et al.* (2006). Las palmeras con troncos leñosos pueden medirse de la misma forma que los árboles de hoja ancha. Los parámetros que deben considerarse (DAP, altura, etc.) dependen de la ecuación alométrica utilizada para cada especie. Por lo general, se miden DAP y altura del tronco principal (de la base a las hojas).

2.3.2 Manglares chaparros

Un gran porcentaje de los manglares tiene una estructura pequeña de menos de uno o dos metros

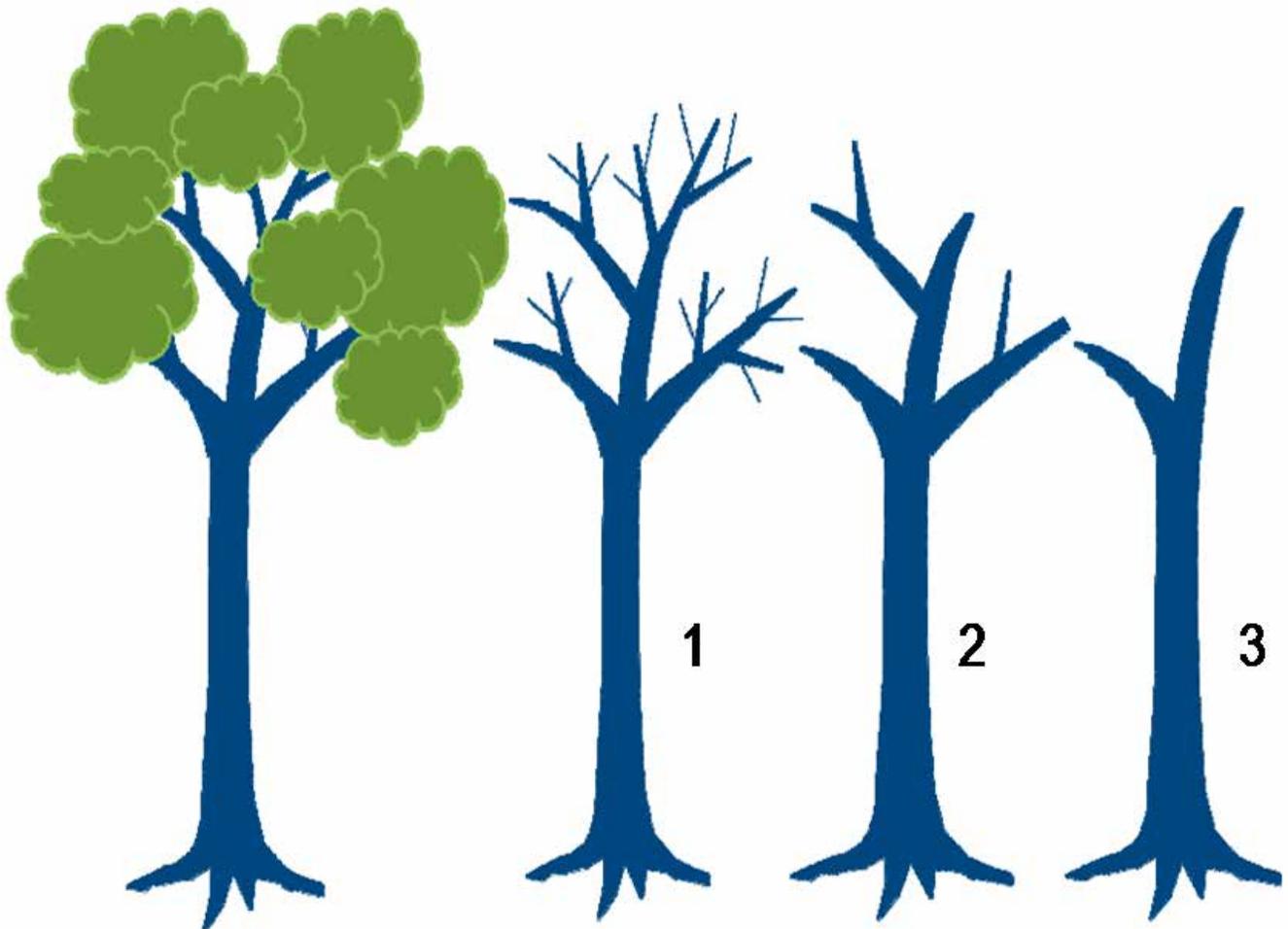


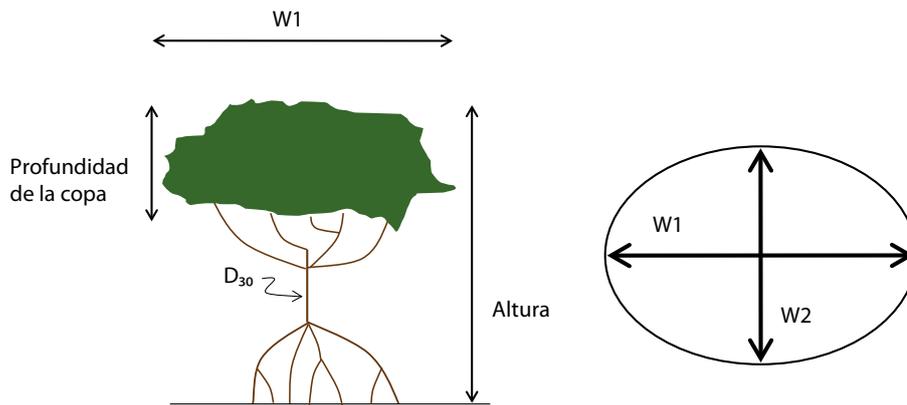
Figura 13. Estado de decaimiento de árboles por clases

Nota: 1) Los árboles en estado 1 murieron recientemente y mantienen muchas de las ramas primarias y secundarias; 2) los árboles en estado 2 sólo conservan algunas de sus ramas secundarias, pero mantienen la mayor parte de las primarias; 3) los árboles en estado 3, son básicamente troncos con pocas o ninguna rama que por lo general están rotos en la punta.

de altura. En México, este tipo de manglar es el dominante en varias zonas de Quintana Roo y en zonas áridas como Baja California Sur. La medición de la biomasa de manglares chaparros utiliza ecuaciones alométricas específicas. Los mejores parámetros para determinar la biomasa de los manglares chaparros son el diámetro del tronco a 30 cm del suelo, el área de la copa y la altura y/o volumen de la copa (Figura 14). Las ecuaciones para la estimación de los manglares chaparros han sido desarrolladas para Florida (Ross *et al.*, 2001; Coronado-Molina *et al.*, 2004) y Puerto Rico (Cintrón y Shaeffer-Novelli, 1984). La ecuación de Ross *et al.* utiliza la altura del tronco a 30 cm del suelo y el volumen de la copa para predecir la biomasa; la ecuación de Cintrón y Shaeffer-Novelli utiliza la altura del árbol y el diámetro del tronco. La primera estima valores de biomasa aproximadamente 12% más bajos que la segunda.

Sería de gran utilidad desarrollar ecuaciones similares para otras regiones. Para realizar ecuaciones alométricas se necesitan de 15 a 25 árboles de cada especie en cuestión, incluyendo árboles desde su estado de plántulas hasta la madurez. Estos árboles tienen que ser cosechados, secados y pesados. La ecuación alométrica se obtiene a partir de la relación entre el diámetro de la copa, volumen de la copa, área de la copa y/o del diámetro del tronco (variables independientes) y la biomasa aérea (variable dependiente).

Las parcelas que se deben utilizar para la medición de los manglares chaparros son de menor tamaño que las utilizadas para manglares altos, ya que por lo general los manglares chaparros forman grupos densos de árboles. Las parcelas para medir manglares chaparros pueden ser de 2 metros de radio, o parcelas en forma de medio círculo si la densidad es extremada ($6,3 \text{ m}^2$;



Área elipsoide de la copa = $(W1 \times W2/2)^2 \times \pi$; donde **W1** es la longitud máxima de la copa cruzando por el centro y **W2** es el ancho de copa, perpendicular a **W1**.
 Volumen de copa = área elipsoide * profundidad de copa.
 La altura se mide desde la superficie del suelo hasta el punto más alto de la copa.
 D_{30} es el diámetro a 30 cm del suelo o por encima de las raíces aéreas.

Figura 14. Mediciones de campo para determinar la biomasa de manglares chaparros

Nota: La biomasa aérea de los manglares chaparros se calcula a partir de ecuaciones alométricas donde la biomasa es la variable dependiente y el diámetro, altura, área y/o volumen de la copa son las variables independientes.

Figura 9). Dentro de cada parcela deben medirse las características de cada árbol chaparro mencionadas en la figura 14 (altura, $W1$ y $W2$ [cm] y D_{30} [mm]) si se va a utilizar la fórmula de Ross *et al.* o la altura del árbol y el diámetro del tronco a 30 cm si se va a utilizar la fórmula de Cintrón y Shaeffer-Novelli. Puede utilizarse cinta métrica para medir la altura y ancho de copa y cinta diamétrica o calibrador vernier para medir el diámetro del tronco.

2.3.3 Copa del árbol

La copa de los árboles es otro parámetro que caracteriza la estructura del manglar. Sus cambios en el tiempo pueden estar relacionados al efecto de las tormentas tropicales, los cambios en el uso del suelo o los efectos a largo plazo del cambio climático. Además, la cobertura de la copa puede servir para interpretar imágenes de satélite y para monitorear la condición del bosque.

Existen varios métodos de medición de la cobertura de copa en el campo y en imágenes satelitales. Algunos incluyen cámaras con lentes gran angular, datos de percepción remota y densitómetros esféricos. El densitómetro es un espejo convexo con una cuadrícula sobrepuesta (Figura 15) que sirve para medir de forma efectiva y a bajo costo la cobertura de la copa. El densitómetro se coloca a 30-40 cm frente al cuerpo a la altura de los codos, de tal forma que no se refleje la cabeza de la persona que está

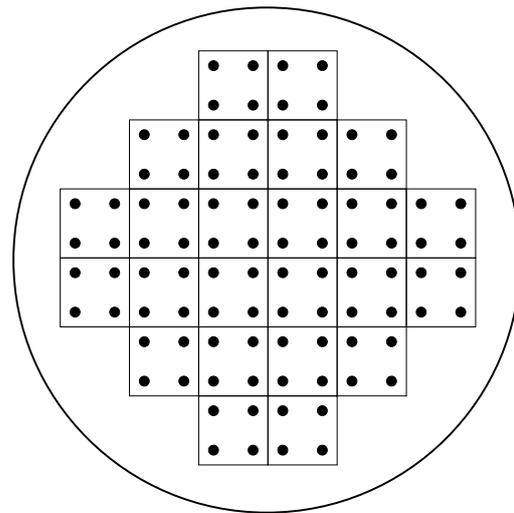


Figura 15. Esquema de densitómetro con cuatro puntos en cada cuadro.

realizando la medición. El instrumento se nivela utilizando la burbuja. Se imagina que cada uno de los cuadrados está a su vez subdividido en cuatro cuadros, cada uno con un punto en el centro. Se cuenta sistemáticamente el número de puntos que no están ocupados por la copa, es decir, los puntos en los que puede verse el reflejo del cielo. El valor obtenido deberá registrarse en una hoja de datos. En cada sitio de muestreo deberán tomarse estas mediciones en varios puntos o en cada parcela muestreada realizando cuatro lecturas en cada punto de muestreo

(norte, sur, este y oeste). Por ejemplo, el centro de cada parcela podría medirse siguiendo el patrón de muestreo de la Figura 6-9. La cobertura de copa se estima como el promedio de estas cuatro lecturas por cada parcela.

2.3.4 Vegetación no arbórea

La mayoría de los manglares no tiene una cantidad significativa de sotobosque o de vegetación no arbórea. La excepción más notable es la ocurrencia de palmas y helechos en manglares ribereños o aquellos asociados a manantiales de agua dulce. La medición de estos componentes dependerá de la densidad, estructura y distribución de la vegetación. Existen varias publicaciones donde pueden encontrarse las diferentes metodologías para su medición (por ejemplo, Mueller-Dombois y Ellenberg, 2003).

Palmas, lianas y vegetación herbácea

La biomasa de palmas, lianas y vegetación herbácea puede determinarse a partir de métodos no destructivos o destructivos (cosecha). Para parcelas permanentes, especialmente para medir especies perennes, deberán utilizarse métodos no destructivos.

Hojarasca

La hojarasca se forma a partir de la caída y acumulación de material orgánico en el suelo (hojas, ramas, corteza, flores y frutos). En la mayoría de los manglares, la cantidad de sotobosque (y por lo tanto, la importancia para la reserva de carbono) suele ser insignificante debido a la alta eficiencia de los cangrejos en consumirlo y a la exportación debida a la inundación de la marea y durante la crecida de los ríos en época de lluvias.

En la mayoría de los estudios, la hojarasca se muestra de forma destructiva a través de microparcels. Cada microparcels puede ser de 90 a 1000 cm², aunque por lo general se utilizan parcelas de 50 x 50 cm (250 cm²). Toda la materia orgánica —excepto la madera— se colecta en una bolsa sobre la cual se escribe el nombre de la localidad, fecha, parcela y número de muestra. Debido a la cantidad de agua que hay en los manglares, es preferible utilizar bolsas de plástico. Al final del día, las muestras deberán secarse en un horno. Debido a la dificultad de acarrear muestras enteras desde el campo y al espacio limitado dentro del horno —especialmente en zonas rurales— el peso húmedo de la muestra puede determinarse en el campo y extraer y secar a peso constante una submuestra homogénea y representativa. Se calcula la proporción entre el

peso húmedo y seco de la muestra y, finalmente, se ajusta el peso seco al peso húmedo de las muestras de hojarasca medido en el campo.

Neumatóforos

Los neumatóforos de manglares del género *Avicennia* pueden tener una biomasa considerable (Figura 2). Al contrario de los árboles de *Rhizophora*, los neumatóforos de *Avicennia* no están incluidos en las ecuaciones alométricas. La densidad de los neumatóforos puede determinarse contando dentro de una microparcels, pudiendo ser esta la misma que se utilizó para medir la hojarasca (véase 2.3.4.2). La masa promedio de un neumatóforo puede utilizarse para calcular la masa total dentro de una parcela. Sin embargo, este cálculo requiere de la toma destructiva de muestras. Alternativamente podría desarrollarse una fórmula que permita determinar la masa de los neumatóforos a partir de su altura. Esta fórmula podría ser de gran importancia para medir la biomasa de los neumatóforos en parcelas permanentes que pudieran instalarse en microparcels con neumatóforos de talla conocida.

Pastos halófilos

En muchos sitios hay manglares asociados a pastos halófilos —tales como *Cladium jamaicense* y *Typha domingensis*— que forman grandes extensiones de lo que en México a veces se conoce como “tular” o “popal”, cuya biomasa puede ser significativa (Figura 16). Para medir la biomasa de los pastos halófilos se utiliza una metodología similar a la de la hojarasca. Se colecta toda la vegetación ubicada dentro de un cuadrante de 20 x 20 cm establecido



Figura 16. Pastizales asociados a manglares en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México

Foto: J.B. Kauffman

en cada parcela. Las muestras pueden guardarse en bolsas de plástico bien identificadas y su contenido se pesa en húmedo en el campo. Para facilitar el transporte de las muestras, se toma una submuestra de peso conocido y se lleva al laboratorio, donde se seca en un horno a una temperatura entre 50 y 60 °C y se vuelve a pesar. Finalmente, se ajusta el peso seco al peso húmedo medido en el campo y se calcula la biomasa por área de muestreo.

Madera muerta caída

Existen diferentes guías y metodologías para determinar el volumen y la biomasa de la madera muerta. La madera muerta puede ser un componente significativo de la biomasa aérea, especialmente en zonas afectadas por perturbaciones naturales como huracanes (Figura 17). La madera muerta tiene una serie de funciones ecológicas importantes en los manglares y el cambio de uso del suelo puede aumentar su cantidad de manera considerable. Es necesario medir este parámetro para determinar de forma adecuada las reservas de carbono y la influencia de las perturbaciones naturales y antrópicas. La madera muerta se mide por lo general dentro de una parcela o en un transecto. La forma más común es la técnica no destructiva de intersección lineal (o planar), que consiste en contar los pedazos de madera a lo largo de un plano vertical (transecto) utilizando transectos en cada parcela (Figuras 6-9).

Usando la técnica de intersección lineal, se mide toda la madera muerta que se localice del suelo hasta 2 metros de altura dentro de un área (troncos sueltos, raíces, ramas de plantas y árboles). Las piezas



Figura 17. Acumulación de madera muerta y caída después de un huracán en manglares de Mahahual, Quintana Roo, México

Foto de M. F. Adame

Tabla 2. Tamaños comúnmente usados para dividir la madera muerta

Descripción		Diámetro
Fino	1 hora	0-0,6 cm
Pequeño	10 horas	0,6-2,5 cm
Mediano	100 horas	2,5-7,5 cm
Grande	1000 horas	> 7,5 cm

de madera de diferentes clases se miden en un transecto (Figura 18). Los pedazos de madera pueden dividirse en cuatro clases dependiendo de su tamaño y una constante comúnmente utilizada en ciencias forestales que se relaciona con la inflamabilidad de la madera y el tiempo requerido para que se incinere completamente: 1 hora, 10 horas, 100 horas y 1000 horas correspondientes a tamaño fino, pequeño, mediano y grande (Tabla 2; Brown, 1971). Las clases que se muestran en la Figura 18 y en la Tabla 2 son las más usadas en inventarios forestales y en las que se basan muchas herramientas y metodologías. Para realizar las mediciones puede utilizarse una cinta métrica, un calibrador vernier o una regla (Figura 19).

Las piezas pequeñas de madera muerta pueden ser abundantes, por lo que para ahorrar tiempo sólo deberán muestrearse subsecciones de cada transecto. Las piezas de tamaño fino (1 hora) se cuentan sólo en los dos primeros metros del transecto. Las piezas pequeñas (10 horas) se cuentan entre los 2 y 3 metros del transecto. Las piezas medianas (100 horas) suelen medirse entre los 3 y 10 metros del transecto. El diámetro de cada pieza de madera grande (1000 horas) deberá medirse a lo largo de todo el transecto (Figura 18).

Cada medida tomada en el transecto deberá agruparse por tamaño. No es necesario medir el diámetro de la madera pequeña y mediana. Hay que medir el diámetro de las piezas más grandes en el punto en el que el transecto cruza la madera. También se debe tomar nota del estado de decaimiento de la madera: a) *duro* si al tratar de golpear la madera con un cuchillo o machete éste rebota o se hunde ligeramente; o b) *podrido* si se hunde considerablemente o si la madera se deshace al contacto. Por lo general, se utilizan múltiples transectos en cada parcela. Siguiendo la metodología propuesta en las figuras 6 y 9, se miden cuatro transectos en cada una de las seis subparcelas, acumulando un total de 24 transectos por sitio.

Consideraciones importantes para medir la madera muerta caída:

1. Los árboles muertos en pie no se consideran madera muerta caída. Para ser considerados como tal, deberán estar separados del árbol madre. Las ramas y los tallos muertos que están unidos al árbol tampoco cuentan como madera muerta caída.
2. Para que un pedazo de madera muerta se cuente en el inventario, debe estar cruzado en el centro por el transecto. La madera muerta no cuenta si el transecto intersecta sólo una porción o esquina.
3. Una pieza de madera puede ser registrada varias veces si está intersectada varias veces (por ejemplo, un tronco de forma curva).
4. En realidad, únicamente la madera grande (> 2,5 cm) es importante para las reservas de carbono. Si se muestrea la hojarasca, es probable que sea más sencillo incluir la madera fina (< 2,5 cm) como parte de la hojarasca.

Suelos

El componente subterráneo es por lo general el más importante en los manglares y su medición es indispensable para determinar las dinámicas a largo plazo del cambio climático y el manejo del uso de suelo. Por lo general, las reservas subterráneas constituyen más del 50%, y a veces hasta el 90%, de la reserva total del carbono de un ecosistema de manglar (Figura 3). A pesar de su importancia, el suelo es el componente menos estudiado en los manglares. Esto probablemente se deba a la dificultad de obtener estimaciones adecuadas y al reciente reconocimiento de la importancia de los manglares como reservas de carbono a nivel global.

Los suelos orgánicos de los humedales son diferentes a los terrestres y, por lo general, son más difíciles de muestrear. A la fecha, no existe una metodología o equipo único para muestrear suelos debido a la gran variabilidad de su contenido mineral y profundidad.

Para medir de forma adecuada las reservas de carbono en el suelo, deben considerarse tres parámetros: 1) profundidad del suelo, 2) densidad, y 3) concentración de carbono orgánico. Es importante tomar en cuenta el número de muestras, la localización de los puntos de muestreo dentro de la parcela y la profundidad a la que se toma la muestra. Debido al costo y la dificultad asociados a este tipo de muestreo, hay que intentar coleccionar la cantidad mínima de muestras necesaria para calcular de forma precisa las reservas de carbono del subsuelo. Estudios recientes han demostrado que

es suficiente medir 6 parcelas por sitio, tomando muestras a diferentes profundidades (Figura 6). Es muy importante decidir a qué profundidad deberán colectarse las muestras. Idealmente, se debe de considerar toda la profundidad del suelo hasta la roca madre o arena de coral. Por lo general, los manglares tienen suelos orgánicos ricos en carbono que miden desde 0,50 metros hasta más de 3 metros. Varias estimaciones en bosques terrestres limitan sus muestreos a los primeros 30 cm, ya que la mayoría del carbono se encuentra a esta profundidad y es esta capa la más vulnerable a cambios de uso del suelo. En los manglares, sin embargo, el uso del suelo y el cambio climático afectan capas más profundas del suelo; por ejemplo, el secamiento, oxidación y colapso de los suelos (véase Hoojier *et al.*, 2006 para efectos similares en turberas). Por lo tanto, es recomendable muestrear por lo menos los primeros 100 cm de suelo en sitios con suelos de más de un metro de profundidad. Para comparar con otros ecosistemas, el perfil del suelo deberá ser muestreado por lo menos en los primeros 30 cm y deberán incluirse muestras representativas de la profundidad entre 30 y 100 cm. Kauffman *et al.* (2011) y Donato *et al.* (2011) muestrearon suelos de manglares a diferentes profundidades y sugieren las siguientes divisiones para muestrear el componente subterráneo de los manglares: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm, y > 100 cm. Para profundidades mayores a 100 cm, se recomienda tomar muestras a un intervalo de 1 metro (i.e. 100-200 cm).

El primer paso para muestrear los suelos en manglares es medir la profundidad a la roca madre o a la arena debajo del suelo. Es posible medir la profundidad con un tipo de varilla de aluminio o acero. Esto puede ser extremadamente difícil o incluso imposible — sobre todo en manglares ribereños donde los sedimentos depositados pueden exceder los 3 metros de profundidad— o relativamente fácil —como en manglares costeros que crecen sobre arena de coral o roca madre. En sitios donde la profundidad total del suelo no puede ser estimada, la reserva de carbono deberá reportarse hasta la profundidad medida con el nucleador y deberá indicarse la profundidad mínima del suelo orgánico.

Para obtener muestras del suelo para medir la densidad y el contenido de carbono es necesario tener un equipo que permita obtener una muestra poco perturbada. Pueden usarse nucleadores especializados para suelos orgánicos (Figura 20). Se recomienda experimentar con diferentes equipos en sitios representativos para determinar el equipo más



Figura 20. Colecta paso a paso de muestras de sedimento utilizando un nucleador

Fotos de Melanie Stidham/USFS

Notas: A) Cortando el sedimento del núcleo de forma transversal para obtener un medio núcleo; B) Superficie limpia del núcleo; C) Medición y marcado de los intervalos de profundidad a medir; D) Cortando la muestra; E) Sacando la muestra del nucleador; F) Colección de muestra en un contenedor previamente pesado.

adecuado. Al llegar al sitio elegido para muestrear, deberá quitarse la hojarasca del suelo e insertar el nucleador de forma vertical hasta que la parte superior del nucleador esté al nivel del suelo. Si el nucleador no logra penetrar hasta el fondo, no hay que forzarlo (es probable que una raíz esté obstruyendo el paso), hay que intentarlo en otro lugar. Una vez introducido el nucleador, debe rotarse en dirección a las manecillas del reloj un par de veces para cortar las raíces delgadas. Finalmente, deberá jalarse el nucleador con la muestra al mismo tiempo que se gira. Si se obtiene una muestra perturbada, habrá que limpiar el nucleador e intentarlo de nuevo en otro punto. Cuando esto ocurra, es importante recordar que esta es una parte comúnmente frustrante cuando se muestrean suelos altamente orgánicos.

Una vez que se logra obtener una muestra casi intacta, deberá medirse el tamaño del núcleo y las profundidades de donde se tomarán las muestras. Esto se puede hacer con una regla o cinta métrica. Pueden tomarse submuestras en un rango de profundidades (en vez de coleccionar todo el núcleo), ya que el contenido de carbono disminuye con la profundidad de forma mucho más gradual que en

los bosques terrestres. El tamaño de las submuestras es por lo general de 3 cm de ancho y pesa entre 10 y 40 g. Las submuestras deberán coleccionarse en la parte central de cada rango de profundidad. Por ejemplo, la muestra de 0-15 cm idealmente debe tomarse entre los 5 y los 10 cm; la muestra de 50-100 cm entre 72,5 y 77,5; la muestra de 100-300 cm entre 197,5 y 202,5 cm, y así sucesivamente.

Para mejorar la eficiencia del muestreo, puede tomarse una sola muestra para medir la densidad relativa y la concentración de carbono (y para realizar otros análisis adicionales que se requieran, como el de nutrientes). Las muestras deben colocarse en un recipiente o bolsa de plástico bien identificado con marcador indeleble con el nombre del sitio, número de parcela, profundidad del suelo, fecha y cualquier otra información relevante. De preferencia, el contenedor se pesa previamente y debe ser de un material que pueda introducirse al horno (por ejemplo, aluminio) ya que las muestras deberán secarse a 60 °C lo más pronto posible. Si no hay horno, se recomienda secar las muestras al sol para disminuir la actividad microbiana (degradación del carbono).

3. Trabajo de laboratorio y análisis de datos

3.1 Biomasa y reservas de carbono de la vegetación

Como primer paso para determinar las reservas de carbono aéreas, es necesario calcular la biomasa de cada componente de vegetación (por ejemplo, árboles grandes, pequeños, madera caída, etc.; Figura 4). Las reservas de carbono aéreas pueden obtenerse multiplicando la biomasa de cada componente por la cantidad de carbono específica (en porcentaje). Para determinar la concentración de carbono, puede obtenerse el valor de cada componente analizando muestras con el método de combustión seca (i.e. usando un Analizador Elemental). Si esto no es posible, pueden utilizarse las concentraciones de carbono publicadas. Por ejemplo, Kauffman *et al.* (2011) reportaron una concentración de carbono de 46,3% en *Bruguiera gymnorrhiza*, de 45,9% en *Rhizophora apiculata* y de 47,1% en *Sonneratia alba*. La concentración de carbono en la madera suele ser ligeramente inferior al 50%, por lo que es práctica común, si no se conocen los valores específicos de la localidad, convertir biomasa a carbono multiplicando por un factor de 0,46-0,5.

3.1.1 Árboles vivos

Para determinar la biomasa de los árboles — incluyendo mangles— pueden utilizarse ecuaciones alométricas. El método se basa en la relación entre la biomasa del árbol (o sus componentes) y parámetros que pueden determinarse en el campo, como el diámetro del tallo principal, especie y altura. El diámetro del tallo principal se mide a la altura del pecho (DAP), es decir a 1,37 cm del suelo o, en el caso de *Rhizophora*, en el tallo por encima de la raíz más alta. Debido a que los mangles están compuestos por pocas especies, éstas pueden identificarse fácilmente con un entrenamiento mínimo. Es importante identificar la especie de mangle ya que las ecuaciones alométricas son específicas para cada especie. También se utiliza la altura como una medida con la que puede calcularse la biomasa de un árbol. Sin embargo, es difícil medir con precisión la altura de un árbol en el campo y por lo tanto no se recomienda hacerlo, a menos que se requiera para otros fines.

Existen varias publicaciones que reportan ecuaciones alométricas para determinar la biomasa de los mangles (por ejemplo, Saenger, 2002; Chave *et al.*, 2005; Smith y Whelan, 2006; Komiyama *et al.*, 2008; Kauffman y Cole, 2010). En las Tablas 3 y 4 se observan las ecuaciones adecuadas para mangles comúnmente encontrados en el continente Americano. Como las ecuaciones son específicas para cada especie de mangle, antes de decidir cuáles utilizar hay que considerar la región geográfica, el clima y las especies del área de estudio. Idealmente, hay que elegir ecuaciones desarrolladas en la región del área de estudio. Debido a la diferencia en estructura y densidad de las diferentes especies, se logrará una mayor precisión en las estimaciones si se utilizan ecuaciones desarrolladas para la propia especie. Por otra parte, la densidad, morfología y relaciones altura-diámetro de la madera varían de forma considerable en diferentes sitios; esto puede afectar la precisión de las ecuaciones. Es también importante considerar el diámetro máximo que se utilizó para desarrollar la ecuación, ya que si se aplica en árboles mayores el resultado podría tener errores significativos (i.e. la biomasa de árboles grandes estaría sobreestimada).

Las distintas ecuaciones alométricas pueden dar resultados muy diferentes (Figura 21). Para árboles con DAP menor de 20 cm, la diferencia en biomasa puede ser pequeña. Sin embargo, la diferencia en las estimaciones de biomasa de individuos grandes (i.e. aquellos con DAP superior a 20 cm) pueden ser mayores. En la figura 21 se observan las predicciones generadas usando distintas ecuaciones alométricas en un mismo grupo de datos obtenido de un bosque en Yap, Micronesia. Por ejemplo, la predicción de la biomasa de un árbol de *Bruguiera* de 69 cm de DAP fue de 2588 kg utilizando la fórmula de Kauffman y Cole (2010) y de 7014 kg utilizando la fórmula general de Komiyama *et al.* (2008). De igual manera, la biomasa estimada para un árbol de *Sonneratia alba* de 45 cm de DAP fue de 873 kg utilizando la fórmula de Kauffman y Cole (2010), pero fue superior a 1500 kg utilizando otras fórmulas. Las diferencias fueron aún más pronunciadas en los árboles más grandes. La biomasa estimada para un árbol de 80 cm de DAP fue 3034 kg utilizando

Tabla 3. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de manglares comúnmente encontrados en el continente Americano

Ecuación	R ²	N	D _{MAX}	Localidad	Referencia
<i>Rhizophora mangle</i>					
Biomasa total: $\log_{10} B = 1,731 * \log_{10} D_R - 0,112$	0,94	14	20	Florida, EUA	Smith y Whelan, 2006
Hojas: $\log_{10} B = 1,337 * \log_{10} D_R - 0,843$	0,93				
Tronco: $\log_{10} B = 1,884 * \log_{10} D_R - 0,510$	0,96				
Ramas: $\log_{10} B = 1,784 * \log_{10} D_R - 0,853$	0,96				
Raíces aéreas: $\log_{10} B = 0,160 * \log_{10} D_R - 1,041$	0,82				
Biomasa total: $\log_e B = 2,5072 * \log_e D_R - 1,5605$	0,94	20	10	Campeche, México	Day <i>et al.</i> , 1987
Tronco: $\log_e B = 2,4120 * \log_e D_R - 1,9122$	0,93				
Ramas: $\log_e B = 2,3286 * \log_e D_R - 2,8633$	0,90				
Raíces aéreas: $\log_e B = 3,1828 * \log_e D_R - 4,4565$	0,83				
*Biomasa total: $0,1282 D_R^{2,6}$	0,92	9	32	Guyana Francesa	Fromard <i>et al.</i> 1998
<i>Avicennia germinans</i>					
Biomasa total: $\log_{10} B = 1,934 * \log_{10} DAP - 0,395$	0,95	8	21,5	Florida, EUA	Smith y Whelan, 2006
Hojas: $\log_{10} B = 0,985 * \log_{10} DAP - 0,855$	0,71				
Tronco: $\log_{10} B = 2,062 * \log_{10} DAP - 0,590$	0,98				
Ramas: $\log_{10} B = 1,607 * \log_{10} DAP - 1,090$	0,77				
Biomasa total: $\log_e B = 2,3023 * \log_e DAP - 1,5852$	0,97	20	10	Campeche, México	Day <i>et al.</i> 1987
Tronco: $\log_e B = 2,4399 * \log_e DAP - 2,0199$	0,97				
Ramas: $\log_e B = 1,820 * \log_e DAP - 2,5845$	0,84				
Biomasa total: $0,14 DAP^{2,4}$	0,97	25	42	Guyana Francesa	Fromard <i>et al.</i> , 1998
<i>Laguncularia racemosa</i>					
Biomasa: $\log_{10} B = 1,930 * \log_{10} DAP - 0,441$	0,98	10	18	Florida, EUA	Smith y Whelan, 2006
Hojas: $\log_{10} B = 1,160 * \log_{10} DAP - 1,043$	0,89				
Tronco: $\log_{10} B = 2,087 * \log_{10} DAP - 0,692$	0,98				
Ramas: $\log_{10} B = 1,837 * \log_{10} DAP - 1,282$	0,95				
Biomasa total: $\log_e B = 2,1924 * \log_e DAP - 1,5919$	0,97	20	10	Campeche, México	Day <i>et al.</i> , 1987
Tallo: $\log_e B = 2,3861 * \log_e D_R - 2,0794$	0,99				
Ramas: $\log_e B = 1,7299 * \log_e D_R - 2,9622$	0,66				
Biomasa total: $0,1023 D^{2,5}$	0,97	70	10	Guyana Francesa	Fromard <i>et al.</i> , 1998

B= biomasa (kg), DAP = diámetro del tronco a la altura del pecho (cm), D_R= diámetro del tronco medido por encima de la raíz aérea más alta en árboles de *R. mangle* (cm), R² = coeficiente de correlación entre la biomasa y la variable independiente, N = número de árboles utilizados para determinar la ecuación, D_{MAX} = diámetro máximo de árboles muestreados (cm).

* Fórmula calculada a partir de árboles de *R. mangle* y *R. racemosa*

Tabla 4. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de manglares chaparros

Ecuación	R ²	N	D _{MAX}	Localidad	Referencia
Rhizophora mangle					
Ln B = 2,528 + (1,129 (Ln D ₃₀ ²)) + (0,156* Ln Vol copa)	0,94	52		Florida, EUA	Ross <i>et al.</i> 2001
B = 125,9571 D ₃₀ ^{2*} H ^{0.8557}	0,99	26	15,4	Puerto Rico	Cintrón y Shaeffer -Novelli, 1984
Avicennia germinans					
Ln B = 2,134 + (0,895 (Ln D ₃₀ ²)) + (0,184* Ln Vol copa)	0,99	21		Florida, EUA	Ross <i>et al.</i> 2001
B = 200,4 D ₃₀ ^{2,1}	0,82	45	4	Guyana Francesa	Fromard <i>et al.</i> 1998

B= biomasa (g), D₃₀ = diámetro del tronco a 30 cm del suelo (cm), H= altura (m), Vol = volumen de la copa (cm³)

la fórmula de Kauffman y Cole (2010) pero fue casi tres veces mayor (9434 kg) con la fórmula general de Komiyama *et al.* (2008). La ecuación de Kauffman y Cole (2010) es la única que considera todos los tamaños de los árboles encontrados en el bosque muestreado.

Estas diferencias tan grandes demuestran la importancia de utilizar las mismas ecuaciones, de ser posible, para comparar diferencias entre sitios, pero sobre todo en el tiempo. Esto último es de particular importancia para participar en estrategias de mitigación como REDD+.

3.1.2 Biomasa subterránea

La biomasa subterránea es un componente importante en los manglares ya que comprende una proporción relativamente mayor del ecosistema que en otros tipos de bosques terrestres. Sin embargo, obtener árboles enteros para determinar ecuaciones alométricas es extremadamente difícil, por lo cual es un componente generalmente fuera del alcance de cualquier proyecto. Existen muy pocas ecuaciones alométricas para estimar la biomasa subterránea de los bosques y aún menos para manglares. Existen algunas ecuaciones útiles para estimar la biomasa subterránea compiladas en Komiyama *et al.* (2008); por lo anterior, una importante contribución para la ciencia sería hacer estudios adicionales.

La ecuación general reportada por Komiyama *et al.* (2008) es:

$$B_{AS} = 0,199 * \rho^{0,899} *(DAP)^{2,22}$$

BAS= Biomasa subterránea de árboles (kg), ρ = densidad de la madera (g/cm³), DAP= diámetro del tronco a la altura del pecho (cm)

Para calcular la biomasa subterránea utilizando la fórmula de Komiyama *et al.* (2008) se requiere conocer la densidad de la madera de árboles vivos (distinta a la densidad de la madera caída). La densidad de la madera puede ser muy variable en individuos de la misma especie en diferentes sitios. Por lo tanto, es recomendable usar valores de densidad de la madera específicos de la zona de estudio. La densidad de la madera (gravedad específica) puede encontrarse en bases de datos de agencias forestales o puede calcularse con muestras colectadas en la zona de estudio. Como alternativa, la base de datos del Centro Mundial Agroforestal (World Agroforestry Centre, 2011), así como Hydayat y Simpson (1994), Simpson (1996) y Zanne *et al.* (2009) proporcionan valores de la densidad de madera de diferentes regiones. En la Tabla 5 se observan ejemplos de la densidad de la madera de diferentes especies en México y zonas aledañas.

El carbono de la masa subterránea de los manglares (raíces) puede calcularse multiplicando la biomasa por la concentración de carbono. La concentración

Tabla 5. Ejemplos de densidad de la madera para especies comunes de mangle

Especie	Densidad (g cm ⁻³)	Región
<i>R. mangle</i>	1,050	Puerto Rico
	0,840	Costa Rica
<i>A. germinans</i>	0,900	Islas Vírgenes (EU)
	0,792	Guyana Francesa
<i>L. racemosa</i>	0,600	Puerto Rico
	0,620	Guyana Francesa

Fuente: Datos obtenidos de Zanne *et al.* 2009 (Base de datos global de densidad de la madera – *Global Wood Density Database*).

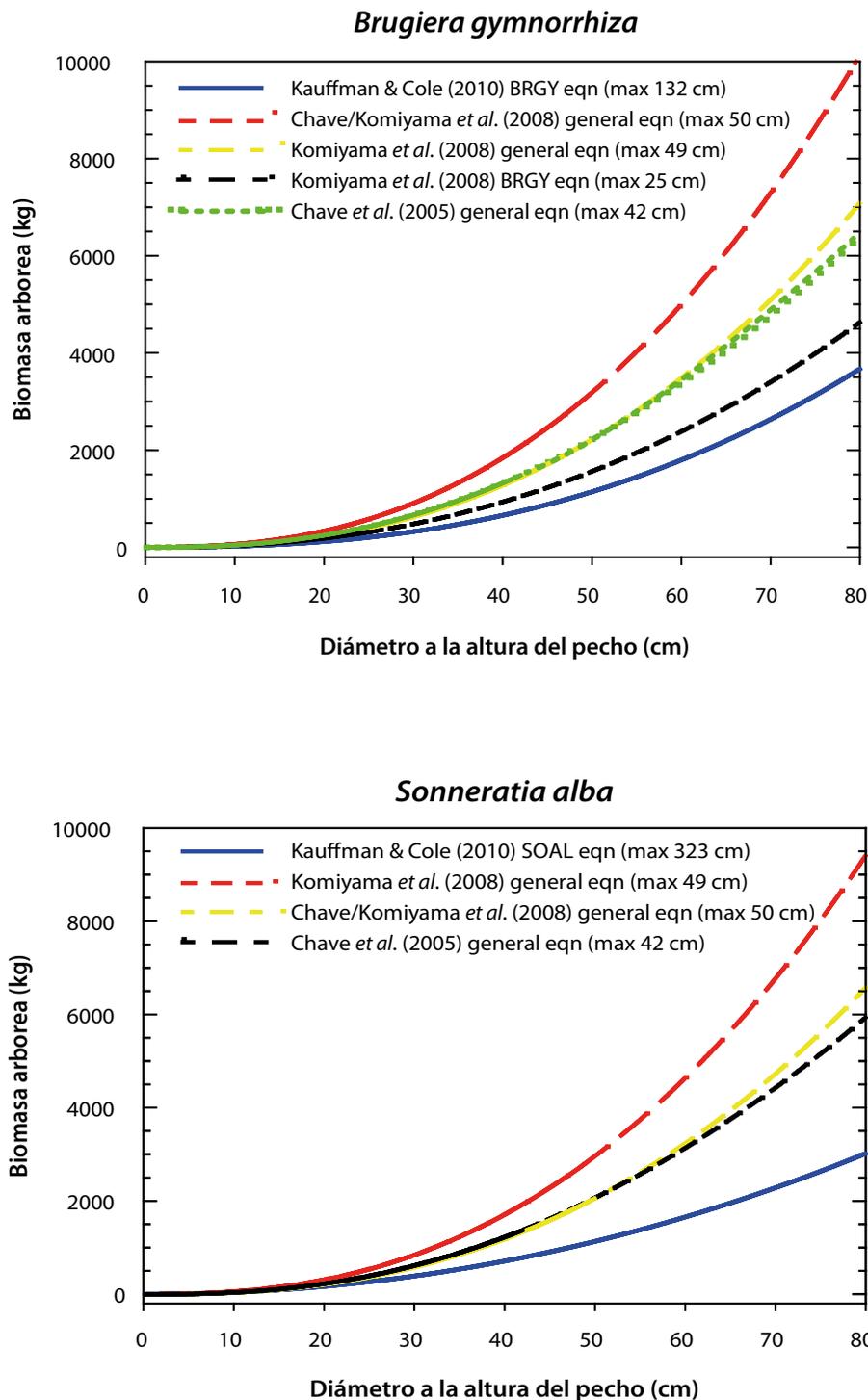


Figura 21. Comparación de la biomasa arborea para dos especies de mangle —*Bruguiera gymnorhiza* y *Sonneratia alba*— con diferentes ecuaciones alométricas

de carbono en las raíces es típicamente menor que la de los componentes aéreos (árboles). Por ejemplo, Jaramillo *et al.* (2003a) reportaron concentraciones de carbono de 36 a 42% en bosques tropicales, lo cual cae dentro del valor aceptado de carbono en raíces de 39%. Los resultados deberán reportarse por hectárea.

3.1.3 Árboles muertos en pie

La biomasa de los árboles muertos en pie puede determinarse de dos formas, correspondientes al nivel de decaimiento. La biomasa de árboles que murieron recientemente (estado de decaimiento 1: aquellos que aún conservan ramas finas, Figura 13) puede calcularse utilizando ecuaciones para árboles vivos

Tabla 6. Gravedad específica y diámetro promedio de la madera muerta de diferentes tamaños utilizada para calcular biomasa

Tamaño	Gravedad específica ± ES	N	Diámetro (cm)	Media cuadrática del diámetro (cm)	N
<0,64	0,48 ± 0,01	117	0,43 ± 0,15	0,43	50
0,65-2,54	0,64 ± 0,02	31	1,33 ± 0,78	1,47	48
2,55-7,6	0,71 ± 0,01	69	4,30 ± 0,18	4,52	52
>7,6	0,69 ± 0,02	61	n.a.	n.a.	n.a.

N= Número de muestras, ES= error estándar, n.a.= no se aplica. Notas: la madera muerta de esta tabla pertenece a un bosque dominado por *Rhizophora apiculata*, *Sonneratia alba* y *Bruguiera gymnorhiza*. La información de densidad de la madera de la Tabla 6 fue tomada de un manglar después de una fuerte tormenta. En un reporte de un bosque dominado por *Rhizophora* en Australia (Robertson y Daniel, 1989) se registraron las siguientes densidades de madera: ramas finas = 0,350-0,628, ramas gruesas = 0,284-0,60, raíces aéreas = 0,276-0,511, y troncos = 0,234-0,340. Estas estimaciones corresponden aproximadamente a la clasificación de tamaños utilizada en la Tabla 6. Las grandes diferencias entre ambos estudios demuestran la necesidad de obtener densidades de madera específicas para cada sitio.

Fuente: Kauffman y Cole, 2010.

(Tabla 3). La única diferencia es que hay que restar las hojas de la biomasa total. Esto puede realizarse usando una ecuación que determine la biomasa de las hojas (como las de Clough y Scott, 1989, Komiyama *et al.*, 2008 y Smith y Whelan, 2006) o restando una constante de 2,5% de la biomasa aérea. La biomasa de árboles en estado de decaimiento 2 puede calcularse de forma similar, restando un porcentaje de la biomasa; sin embargo, debido a que estos árboles han perdido parte de sus ramas, deberá restarse la biomasa de las hojas y un estimado de las ramas. Por lo general, se resta de 10 a 20% de la biomasa (incluyendo hojas y algunas ramas) del total. Este porcentaje puede ajustarse para situaciones específicas utilizando el conocimiento local.

Existen diferentes métodos para determinar la biomasa de árboles muertos en estados de decaimiento más avanzados. Los árboles con en estado 3 han perdido una porción significativa de su volumen y esta pérdida es difícil de cuantificar. El restante del árbol deberá calcularse como la biomasa del tronco principal usando la fórmula alométrica correspondiente por especie (Tabla 3).

La biomasa de los árboles muertos puede convertirse a carbono utilizando la concentración de carbono obtenida en el sitio. Alternativamente, puede utilizarse un valor del 50%. Los resultados deberán presentarse como carbono por hectárea (como en Kauffman *et al.*, 1995).

3.1.4 Lianas

Existen varias ecuaciones que pueden utilizarse para estimar la biomasa de las lianas. La biomasa de las

lianas puede estimarse por medio de la siguiente ecuación alométrica general:

$$B = D^{2,657*} e^{-0,968*} \ln(D)$$

B= Biomasa (kg)

D = Diámetro de liana medido a 130 cm del suelo

R²= 0,69, N= 424

También puede utilizarse la ecuación alométrica para lianas en zonas tropicales desarrollada en China (Lu *et al.*, 2009):

$$B = 0,1498 + 1,7895* \ln(D)* \ln(D)$$

B= Biomasa (kg)

D = Diámetro de liana medido a 130 cm del suelo

R²= 0,87, N= 25

La biomasa de las lianas puede convertirse a carbono utilizando una concentración obtenida en el sitio de estudio. La concentración de lianas en bosques tropicales ha sido reportada como 46%; por ejemplo, por Jaramillo *et al.*, 2003b. Un valor aceptable podría ser 0,46 y los resultados deberán presentarse como toneladas de carbono por hectárea.

3.1.5 Sotobosque y hojarasca

El sotobosque (plántulas y vegetación no arbórea) de los manglares es por lo general poco importante y suele ser innecesario medir este componente para determinar las reservas de carbono de un manglar. Una excepción podría ser los manglares asociados a ojos de agua dulce o "petenes" en Yucatán, los cuales pueden tener un sotobosque espeso. En estos

casos, el carbono del sotobosque puede calcularse multiplicando la biomasa en seco por el valor de carbono de las especies dominantes, de forma similar al cálculo de biomasa de pastos asociados (ver 2.3.4.4).

Igualmente, la hojarasca es un componente pequeño de la reservas de carbono de los manglares y, por lo mismo, no es necesario medirlo. Si fuera colectada, la biomasa en seco del área de la subparcela (por ejemplo, 50 x 50 cm) deberá extrapolarse a una hectárea. La concentración promedio de carbono de la hojarasca se ha registrado entre 38 y 49%, por lo que se recomienda un factor de conversión de 0,45.

3.1.6 Madera muerta y caída

La técnica de la intersección lineal que se utiliza para medir la madera caída con un diámetro menor de 7,5 cm (i.e. fina, pequeña y mediana, definidas en la Tabla 2) permite el cálculo de su biomasa. Para esta técnica hay que colectar varias piezas de madera muerta de diferentes tamaños, con las cuales se determina el valor promedio de densidad o gravedad específica. El diámetro promedio de una pieza de madera puede obtenerse de medir entre 50 y 100 piezas elegidas al azar en la zona de estudio. Para realizar las mediciones puede utilizarse un calibrador. Se recomienda utilizar el diámetro promedio cuadrático (DPC) de las piezas de madera para calcular el volumen, más que el diámetro promedio de las categorías de madera. El DPC se calcula de la siguiente forma:

$$DPC = \sqrt{(\sum d_i^2)/n}$$

d_i = diámetro de cada muestra de madera por clase
 n = número de piezas de madera muestreadas

Debe determinarse la gravedad específica para cada categoría de madera muestreada (fina, pequeña, mediana, grande dura, grande podrida). Se recomienda colectar al menos de 20 a 25 piezas de cada categoría para calcular la variabilidad entre todos los tamaños y especies presentes en el bosque. Como pauta general, cada pieza colectada deberá pesar entre 0,5 y 50 g. Las piezas deberán seleccionarse al azar dentro del área de estudio, pero no dentro de parcelas permanentes ya que esto podría afectar mediciones futuras. La gravedad específica se calcula de acuerdo con el peso en seco y el volumen de cada muestra. El volumen puede obtenerse sumergiendo cada pieza de madera en un contenedor con agua colocado

sobre una balanza digital. La pieza de madera se une a un aro suspendido sobre la balanza con una aguja. Se sumerge la pieza de madera en el agua (sin que esta toque el fondo o las orillas del contenedor) y se anota el cambio en masa. El incremento de masa equivale al volumen desplazado de la madera, ya que la gravedad específica del agua es de 1 g/cm³. Para obtener la gravedad específica se divide la masa de cada pieza entre el volumen. Finalmente, se calcula el promedio para cada categoría. Esos valores se utilizan para determinar la biomasa y/o las concentraciones de carbono. La Tabla 6 muestra ejemplos de DPC y gravedad específica de la madera caída para manglares. El volumen de la madera muerta para cada sitio se calcula con los datos tomados usando la intersección lineal. Puede usarse la siguiente ecuación para determinar el volumen de las tallas de madera fina, pequeña y mediana:

$$\text{Volumen (m}^3 \text{ ha}^{-1}) = \frac{\pi * (N_i * DPC_i^2)}{8 * L}$$

N_i = número de piezas intersectadas de clase i
 DPC = promedio cuadrático del diámetro de clase i (cm)
 L = longitud del transecto (m)

La siguiente ecuación se utiliza para calcular el volumen individual de tallas grandes de madera caída (de diámetro mayor a 7,5 cm):

$$\text{Volumen (m}^3 \text{ ha}^{-1}) = \frac{\pi * (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)}{8 * L}$$

d_1, d_2 = diámetros de piezas de madera grandes interceptadas (cm)
 L = longitud del transecto para piezas grandes (m)

La biomasa de la madera se calcula a partir del volumen multiplicado por la gravedad específica y después se convierte a masa de carbono. Se recomienda determinar las concentraciones de carbono de la madera en el sitio de muestreo. Alternativamente, según los valores de madera muerta de bosques tropicales, puede utilizarse un factor de 50%. En la Tabla 7 se presentan ejemplos de masa de la madera caída.

3.1.7 Suelos

Para calcular la masa de carbono en suelos es necesario conocer la profundidad, la densidad específica y la concentración de carbono del suelo.

Tabla 7. Biomasa de madera muerta (Mg ha⁻¹) por clase (diámetro en cm) y condición en manglares de Yap, República Federal de Micronesia

Sitio	≥ 7,6 cm dura	≥ 7,6 cm podrida	2,55- 7,5 cm	0,65-2,54 cm	≤ 0,64 cm	Biomasa total
Maaq	9,8 ± 5,2	0,3 ± 0,3	7,9 ± 0,4	6,0 ± 1,0	0,1 ± 0,0	24,1 ± 5,8
Qatliw	14,0 ± 2,1	0,0 ± 0,0	9,0 ± 1,1	8,7 ± 0,4	0,6 ± 0,1	32,3 ± 2,8
Ruunuw	42,5 ± 17,2	0,0 ± 0,0	8,0 ± 1,5	5,5 ± 0,8	0,5 ± 0,1	56,5 ± 15,8
Tabinify	23,3 ± 6,4	1,8 ± 1,8	9,8 ± 0,3	6,7 ± 0,9	0,2 ± 0,0	41,7 ± 6,8
Qamum	14,1 ± 10,1	0,0 ± 0,0	5,9 ± 1,1	3,1 ± 0,9	0,2 ± 0,1	23,2 ± 10,3
Qaaf	13,9 ± 3,1	0,3 ± 0,3	7,5 ± 1,2	9,0 ± 1,0	0,4 ± 0,1	31,1 ± 4,2

3.1.8 Densidad relativa

Las muestras tomadas en el campo deberán secarse a volumen constante en un horno a 60 °C. Las muestras no deberán secarse a una temperatura mayor a la recomendada, ya que esto puede ocasionar que la muestra pierda carbono. En algunos protocolos se recomienda secar la muestra a 105 °C con la finalidad de que el agua hierva y se evapore. Sin embargo, para aplicar esta metodología haría falta tomar dos muestras en el campo, ya que éstas no deben ser expuestas a temperaturas tan altas. Los autores han determinado que la densidad del suelo en los manglares calculada secando las muestras a 60 °C difiere en aproximadamente 1% de la calculada con muestras secadas a 105 °C. La diferencia es insignificante, por lo que puede evitarse el esfuerzo de coleccionar el doble de muestras. Por lo general, se requieren 48 horas para que una muestra se seque a 60 °C. Deberá tenerse mucho cuidado en verificar que la muestra esté completamente seca antes de pesarla. Se puede acelerar el proceso de secado si se rompe cuidadosamente la muestra en pequeños pedazos.

La densidad del suelo se calcula dividiendo la muestra secada entre su volumen utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad relativa del suelo (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Masa de muestra seca (g)}}{\text{Volumen de muestra (m}^3\text{)}}$$

3.1.9 Concentración de carbono en el suelo

Las muestras del suelo deben enviarse a un laboratorio con experiencia en análisis de carbono. El laboratorio seleccionado deberá cumplir con los protocolos estándar de secado, preparación y lectura de la muestra. Para cuantificar la cantidad de carbono en el suelo puede utilizarse el método de combustión seca con un analizador elemental o la combustión

húmeda. La combustión seca es la metodología más apropiada para el análisis de carbono total y utiliza un horno de inducción a altas temperaturas. Se suele utilizar la combustión húmeda siguiendo el método de Walkley-Black porque es fácil y requiere de poco equipo. Sin embargo, los resultados obtenidos con esta metodología no son cuantitativos y el método produce desechos tóxicos. Otro método rápido mas no cuantitativo es el de pérdida por ignición (*Loss on ignition*, LOI), el cual se utiliza para determinar el porcentaje de materia orgánica en el suelo a través de la combustión de la muestra a altas temperaturas, por lo general a 550 °C. El carbono total de los suelos orgánicos puede calcularse como la concentración de materia orgánica (porcentaje) dividida entre 1,86 a 1,89. Debido a las limitaciones de este método, es necesario verificar los resultados obtenidos.

En suelos orgánicos en manglares de Palaos se calculó que la concentración promedio de carbono puede determinarse dividiendo la cantidad de materia orgánica entre 2,06. Sin embargo, la proporción entre materia orgánica y carbono varía entre 1,33 y 2,80, lo cual sugiere que existen errores asociados al uso del método LOI. Se encontró una asociación positiva, aunque no particularmente fuerte ($R^2 = 0,59$) entre la cantidad de materia orgánica determinada utilizando LOI y la concentración de carbono obtenida por medio de la combustión seca (Figura 22). La ecuación de la regresión descrita en la figura 22 puede utilizarse para predecir la concentración de carbono basándose en los valores de materia orgánica derivados de LOI.

Por otra parte, existen zonas con grandes cantidades de carbonatos (carbono inorgánico) en el suelo. Por ejemplo, en manglares chaparros de la Península de Yucatán, la cantidad de carbonatos puede ser superior al 30%. En estos casos, es muy importante corregir la cantidad de carbono en el suelo ya que a las

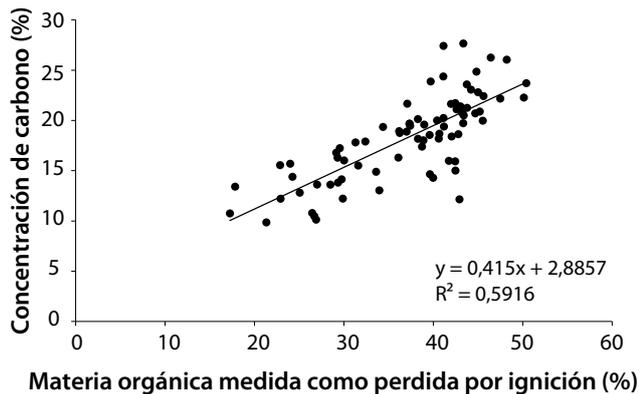


Figura 22. Relación entre la materia orgánica (calculada a través de la pérdida por ignición) y la concentración de carbono (%) calculada a través de combustión seca para el suelo de manglares de la República de Palaos

Nota: La concentración de carbono y las reservas de este sitio pueden consultarse en Kauffman *et al.* (2011)

estrategias de mitigación al cambio climático sólo les interesa el carbono orgánico. Existen tres formas de hacer la corrección para carbonatos:

1. Acidificando la muestra antes de leerla en el autoanalizador. Se agregan unas gotas de ácido clorhídrico ($\approx 200 \mu\text{L}$, 10%) a una muestra previamente pesada hasta que ésta deje de burbujear. El ácido causará la pérdida de carbonatos en forma de CO_2 (las burbujas que se observan). La muestra se seca a 60°C y se vuelve a pesar. Posteriormente, la muestra se lee en el autoanalizador, con lo que se obtiene la cantidad de carbono orgánico. El resultado deberá corregirse para la pérdida/ganancia de peso que se observó al agregar el ácido. Asimismo, la cantidad de carbono inorgánico puede calcularse leyendo una réplica de la misma muestra sin acidificar (carbono total) y calculando la diferencia (carbono total = carbono orgánico + carbono inorgánico). Este método es comúnmente utilizado y es relativamente sencillo. Existen algunos problemas con su uso, ya que el ácido puede degradar la materia orgánica y dañar algunas partes de ciertos equipos.
2. Diferencia en ignición (DOI-*Difference on ignition*; Kristensen y Andersen, 1978). Se lee una muestra en el autoanalizador para obtener el contenido de carbono total. Paralelamente, se calcina a 550°C una réplica de la misma muestra (método de pérdida por ignición

LOI). La muestra calcinada estará compuesta principalmente de carbono inorgánico ya que, a 550°C , la materia orgánica se pierde en forma de CO_2 . Esta segunda muestra se lee en el autoanalizador: la lectura nos dará el contenido de carbono inorgánico. A partir del valor de carbono total obtenido de la primera muestra y el carbono inorgánico obtenido de la segunda puede calcularse el contenido de carbono orgánico (carbono total = carbono orgánico + carbono inorgánico).

3. Se lee una muestra en el autoanalizador. Por separado, se calcula el porcentaje de contribución de carbono orgánico e inorgánico utilizando el método de pérdida por ignición (LOI). Para ello, se calcina una réplica de la muestra de peso conocido a 550°C ; esta misma muestra se pesa y se vuelve a calinar a 950°C . La pérdida de peso de la muestra después de ser calcinada a 550°C corresponderá al valor de materia orgánica; la diferencia de peso entre la muestra después de ser calcinada a 550°C y después de ser calcinada a 950°C corresponderá a la cantidad de carbonatos. Se calcula la cantidad de carbono orgánico e inorgánico a partir del porcentaje de materia orgánica y carbonatos utilizando factores de conversión como los sugeridos por Dean (1974). La proporción entre carbono orgánico e inorgánico se multiplica por la concentración de carbono obtenida con el autoanalizador. De esta forma se tendrá el valor de carbono total, orgánico e inorgánico.

Para obtener información adicional sobre el muestreo y procesamiento en laboratorio de suelos se puede consultar a Sparks y Bartels (1996), Robertson *et al.* (1999), Schumacher (2002), y Burton y Pregitzer (2008).

3.1.10 Cálculo de reservas de carbono en el suelo

Las reservas de carbono en el suelo se obtienen a partir de la suma de la masa de carbono de cada intervalo de profundidad muestreado. Por ejemplo, en la tabla 8 puede observarse la reserva de carbono a varias profundidades del suelo: 0-15 cm, 15-30 cm, 50-100 cm y 100-300 cm. En cada intervalo de profundidad se calculó la densidad y la cantidad de carbono.

La masa de carbono por intervalo de profundidad puede calcularse de la siguiente forma, donde el porcentaje de carbono (% C) equivale a

concentración de carbono expresada como número entero:

$$\text{Carbono del suelo (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{densidad relativa (g cm}^{-3}\text{)} * \text{intervalo de muestreo (cm)} * \% \text{C}$$

La cantidad de carbono se determina sumando las masas de carbono calculadas para cada intervalo de profundidad. Idealmente, se considerará toda la capa de carbono orgánico del suelo (de la superficie hasta la roca madre o arena). Sin embargo, en algunas zonas —como en manglares ribereños— es difícil muestrear todo el suelo orgánico, pero, si se conoce la profundidad del suelo (medida con una varilla o alguna vara), puede estimarse la reserva de carbono total. De otra forma, la reserva de carbono del suelo estará subestimada.

3.2 Reserva de carbono del ecosistema

La reserva total de carbono del ecosistema de manglar se calcula sumando todos los componentes analizados. Primero, se obtiene el promedio de las parcelas para cada componente (e.g. árboles, suelos). Los promedios se suman para obtener el total.

La ecuación para calcular la reserva de carbono del ecosistema es la siguiente:

$$\text{Reserva de carbono total (Mg ha}^{-1}\text{)} = C_{\text{árboles A}} + C_{\text{árboles S}} + C_{\text{árboles M}} + C_{\text{plántulas}} + C_{\text{otra veg}} + C_{\text{madera muerta}} + C_{\text{suelo}}$$

- $C_{\text{árboles A}}$ = reserva de carbono aérea de árboles
- $C_{\text{árboles S}}$ = reserva de carbono subterránea de árboles
- $C_{\text{árboles M}}$ = reserva de carbono de árboles muertos
- $C_{\text{plántulas}}$ = reserva de carbono de plántulas
- $C_{\text{otra veg}}$ = reserva de carbono de vegetación no arbórea
- $C_{\text{madera muerta}}$ = reserva de carbono en madera muerta y caída
- C_{suelo} = reserva de carbono en el suelo

La ecuación para obtener la reserva de carbono de una región o zona específica es la siguiente:

$$\text{Reserva de carbono de área de estudio (Mg)} = \frac{\text{Reserva de carbono total (Mg ha}^{-1}\text{)} * \text{Área (ha)}}{\text{Área (ha)}}$$

Puede calcularse la reserva de carbono para diferentes tipos de manglar en un sitio de estudio (por ejemplo, manglar chaparro, manglar de franja, matorral asociado a manglar). Idealmente, deberá contarse con el área de ocurrencia de cada tipo de vegetación para poder calcular la reserva de carbono cada una de ellas. El total de carbono de toda el área de estudio podrá

obtenerse de una forma más exacta si se multiplica la reserva de carbono de cada tipo de manglar por la superficie que ocupa. Un ejemplo de este análisis puede observarse en las Tablas 8 y 9, donde se calculó la reserva de carbono de cada tipo de manglar y de toda la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an.

3.2.1 Conversión a dióxido de carbono equivalente

Los inventarios (y emisiones) de gases de efecto invernadero por lo general se reportan en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) o CO₂e. Esto se debe a que el CO₂ es el gas de efecto invernadero más común derivado del carbono. La deforestación y la degradación de los bosques producen emisiones de gases, en su mayoría CO₂ con menores contribuciones de CH₄.

Las reservas de carbono pueden convertirse a unidades de CO₂e multiplicando la reserva de carbono por 3,67. Este valor es la proporción molecular entre el peso del dióxido de carbono [44] y el del carbono [12]. Por ejemplo, los manglares de Micronesia tienen un CO₂e de 2074-4621 Mg ha⁻¹. Estos valores se encuentran entre los más altos reportados para reservas de carbono de cualquier tipo de bosque. Estas reservas de carbono son también las más vulnerables a los cambios de uso del suelo y a los efectos del cambio climático. Se considera que el reporte de carbono en CO₂e es conservador, ya que las emisiones de otras formas de carbono (como el CH₄) son gases de efecto invernadero mucho más fuertes que el CO₂.

3.3 Cuantificación de la incertidumbre asociada a la estimación de las reservas de carbono

Es importante incluir en los cálculos la incertidumbre asociada a la medición de los componentes de carbono y del carbono total de la zona de estudio.

Tabla 8. Reservas de carbono para diferentes tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México

Tipo de manglar	C (Mg ha ⁻¹)
Manglar de petén	1325 (134)
Manglar de franja alto	648 (41)
Manglar de franja mediano	623 (41)
Manglar chaparro	381 (52)
Manglar asociado a pastizal	177 (73)

Tabla 9. Reservas de carbono en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México

	Superficie	Superficie	Reserva de carbono	
	(ha)	(%)	(Millones de toneladas)	
Vegetación				
Manglar	58 837	34,2	22,4 – 37,2	CONABIO (2009)
(alto, mediano, chaparro)				
Manglar de petén	700	0,4	0,93	Serie III, INEGI (2005)
Manglar asociado a pastizal	112 640	65,4	19,9	Inventario Nacional Forestal, INEGI (2000)
TOTAL	172 176		43,2 – 58,0	

Nota: El manglar de "peten" se refiere a manglares asociados a ojos de agua dulce. Este tipo de vegetación es característico de la Península de Yucatán.

La incertidumbre es un reflejo de la precisión de los datos (i.e. la variación alrededor del valor promedio). Para reportes de carbono, suele utilizarse un intervalo de confianza (IC) de 95%, el cual se presenta como el porcentaje de variación alrededor de la media. Por ejemplo, si el valor es de 100 Mg ha⁻¹ y el IC a 95% es de 90-110 Mg ha⁻¹, la incertidumbre de la estimación es de ±10%. Pueden encontrarse definiciones clave para las estimaciones de incertidumbre en inventarios forestales en GOF-C-GOLD (2011).

3.3.1 Incertidumbre en la estimación de las reservas de carbono por componente

El primer paso es calcular el IC a 95% para cada componente (árboles, madera muerta, suelos, etc.). Prácticamente, el IC a 95% es el promedio ± dos veces el error estándar (SE) de la media. En otras palabras, la mitad del IC a 95% = 2*SE.

La mitad del IC a 95% se utiliza para expresar la incertidumbre de un promedio.

Incertidumbre (%) = 100 * (mitad del IC)/promedio

3.3.2 Incertidumbre en la estimación de la reserva total de carbono

La reserva total de carbono puede calcularse como la suma de todos los componentes (árboles, madera muerta, suelos, etc.), con una incertidumbre asociada a cada componente. Para calcular la incertidumbre para la reserva total de carbono es necesario conjuntar la incertidumbre de todos los componentes.

Existen dos métodos que se utilizan para calcular la incertidumbre total de la reserva de carbono: Pearson *et al.*, 2005; 2007 y GOF-C-GOLD, 2011.

El primer método utiliza la propagación de error simple a través de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los errores de los componentes. El segundo método utiliza la simulación de Monte Carlo para propagar errores. La ventaja del primer método es que es sencillo y no requiere un programa específico de cómputo. El segundo método puede utilizarse cuando existen datos correlacionados (por ejemplo, entre dos reservas de carbono) y/o cuando las incertidumbres son muy grandes (por ejemplo, superiores al 100%) y/o cuando la distribución de los datos se desvía mucho de la normalidad. En teoría, es mejor utilizar la simulación de Monte Carlo ya que es un análisis sólido. Si en el proyecto existe una persona calificada para realizar este método, es preferible utilizarlo. Sin embargo, la diferencia en resultados obtenidos con ambos métodos suele ser pequeña, a menos que existan fuertes correlaciones y/o incertidumbres importantes. Por lo tanto, el análisis de propagación de error simple de las reservas totales de carbono puede realizarse utilizando la fórmula para obtener la mitad del IC a 95%:

$$\text{Mitad del IC 95\% para reservas de carbono} = \sqrt{([95\% \text{ CI}_{C1}]^2 + [95\% \text{ CI}_{C2}]^2 + \dots + [95\% \text{ CI}_{Cn}]^2)}$$

[95% CI_{C1}] es el 95% IC para la reserva 1 (e.g. reserva árboles), reserva 2, y así sucesivamente hasta incluir todas las reservas muestreadas en las parcelas.

Para manglares es recomendable que los componentes incluyan árboles vivos y muertos, madera muerta, raíces y suelo. Estos cuatro componentes por lo general incluyen más del 95% de la reserva de carbono real. La incertidumbre asociada a la reserva de carbono puede reportarse como un rango alrededor del promedio o como el porcentaje del promedio.

3.3.3 Incertidumbre en la estimación de las reservas de carbono extrapoladas a zonas, áreas o regiones.

Para determinar la incertidumbre de las reservas de carbono estimadas para grandes áreas se utiliza el mismo concepto que para la medición a nivel de bosque. Sin embargo, la fórmula es ligeramente diferente ya que la estimación requiere de la multiplicación, en vez de la suma, de los componentes (véase ecuación para reserva de carbono a nivel de bosque).

El análisis remoto de tipos de vegetación tiene un cierto error asociado. Este error o incertidumbre debe combinarse con la incertidumbre asociada a la estimación a nivel del bosque utilizando la siguiente ecuación (para determinar la incertidumbre de la reserva total de carbono para un área de estudio):

$$\text{Mitad del IC 95\% para reservas de carbono de un área de estudio} = \text{área} * \text{RCP} \sqrt{([\text{95\% CI}_{\text{área}}/\text{área}]^2 + [\text{95\% CI}_{\text{RCP}}/\text{RCP}]^2)}$$

Área = área estimada para manglar (ha)

RCP = reserva de carbono promedio en manglares (Mg ha⁻¹)

95% IC_x = la incertidumbre asociada a cada parámetro (expresada como la mitad del 95% IC)

Por ejemplo, si se estima que un manglar de 400 000 ± 30 000 ha contiene una cantidad de 300 Mg ha⁻¹ de carbono, la reserva total de carbono de dicha área es de 400 000 ha * 300 Mg ha⁻¹ (120,000,000 Mg). La incertidumbre de este valor se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Mitad del IC 95\% para} &= 400\,000 * 300 \\ ([30\,000/400\,000]^2 + [30/300]^2) &= 15\,000\,000 \text{ Mg} \\ \text{reservas de carbono (Mg ha}^{-1}\text{)} & \end{aligned}$$

De igual forma que las estimaciones de carbono a nivel de bosque, la incertidumbre del cálculo de la reserva de carbono de un área deberá reportarse como un intervalo o como un porcentaje del promedio calculado.

4. Reporte de datos

El último paso es quizás el más importante: presentar y publicar los resultados de manera interpretativa. Reportar los datos puede ser tan simple como presentar la composición de especies, biomasa y reservas de carbono del ecosistema (aéreo y subterráneo) tal como se muestra en la figura 3. Por otra parte, cuando se requieren líneas base de información, es conveniente dividir la biomasa

y la reserva de carbono en sus componentes (Figuras 4 y 22).

Dividir el ecosistema en componentes basados en la estructura del bosque y en la profundidad del suelo es de especial importancia para la interpretación a largo plazo de las parcelas permanentes cuando los objetivos del proyecto incluyan la cuantificación de

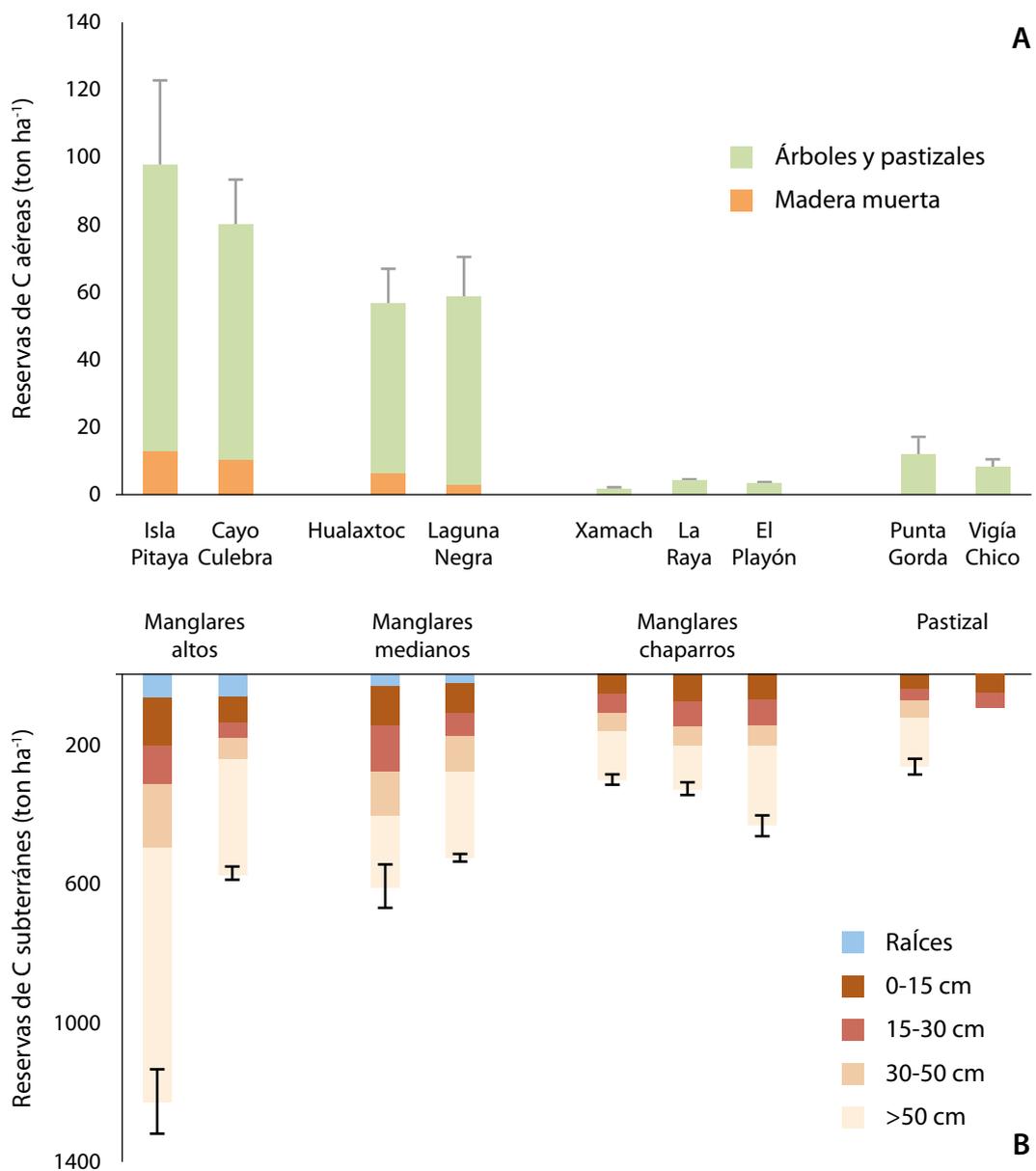


Figura 23. Reservas de carbono (Panel A= aéreas; Panel B = subterráneas) de diferentes tipos de manglar en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, México

C = carbono

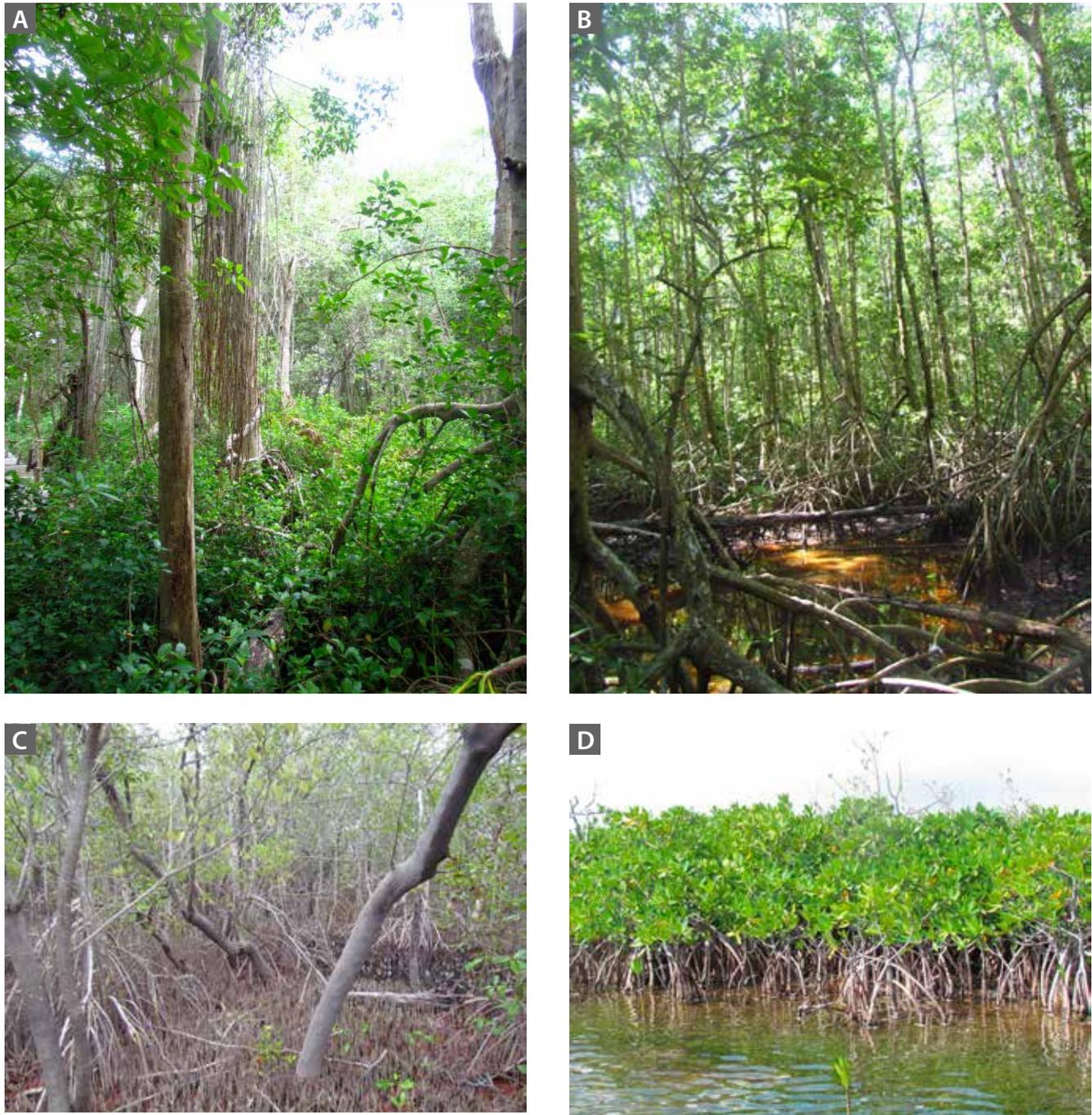


Figura 24. Fotos representativas de diferentes tipos de manglar. A) Bosque dominado por *Laguncularia racemosa* en Celestún, Yucatán, B) Bosque de franja dominado por *Rhizophora mangle* en La Encrucijada, Chiapas, C) Bosque de cuenca dominado por *Avicennia germinans* en Celestún, Yucatán, D) Bosque chaparro de *Rhizophora mangle* en Nichupté, Quintana Roo.

Fotos M. F. Adame

los cambios de la estructura y las reservas de carbono en el tiempo. Dividir las reservas de carbono por componentes facilita la interpretación y aumenta la precisión en la determinación de cambios en las reservas de carbono en el tiempo, lo cual puede ocurrir a causa del manejo del suelo, uso del suelo o cambio climático. También facilita el reporte de análisis estadísticos, los cuales pueden determinar cambios en el carbono total o en los componentes.

Las gráficas de barras o de pastel (Figura 23) son útiles para presentar las reservas de carbono. Las fotos que acompañan a las gráficas pueden dar al lector una idea del tipo, composición y estructura de los manglares en cuestión (Figura 24). Las gráficas también son valiosas para la interpretación rápida de la reserva de carbono individual y para comparar los componentes del ecosistema. Asimismo son útiles para comparar diferencias estructurales en diferentes

manglares, o entre tipos de manglar dentro del mismo bosque. Por ejemplo en la figura 23 puede observarse claramente que la reserva de carbono del suelo comprende la mayor parte de la reserva de carbono del ecosistema, mientras que la reserva de carbono en la vegetación aérea comprende el 18% de la reserva en manglares de franja y entre el 11 y el 15% en manglares ribereños. Las figuras también muestran la variación en las reservas del subsuelo, con un rango entre 482 y 1120 Mg ha⁻¹, lo que causa la variación de las reservas de carbono en diferentes manglares.

Es necesario dividir las reservas de carbono en componentes para poder comparar diferentes ecosistemas, pero sobre todo para poder determinar cambios en el tiempo en parcelas permanentes. Puede ser útil dividir en subcomponentes basados en especies. Los datos en la Tabla 10 muestran la variación entre el tamaño y la repartición del carbono de las reservas de carbono a nivel ecosistema de los manglares de la región de Asia-Pacífico.

Tabla 10. Ejemplos de reservas de carbono de un ecosistema de manglar divididas en componentes

	Yap, Micronesia	Babeldoab, República de Palaos	Sundarbans, Bangladesh	Kalimantan, Indonesia
Geomorfología	Franja costera	Franja costera	Delta río Ganges	Estuarino/riverino
Especie dominante	<i>Sonneratia alba</i>	<i>Rhizophora apiculata</i>	<i>Heriteria fomes</i> <i>Exoecaria agallocha</i>	<i>Rhizophora apiculata</i> <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>
Árboles vivos (cm DAP)				
0-10	0,6	6,4	8,3	2,5
10-30	17,0	65,6	39,8	23,6
30-50	45,3	16,6	8,2	62,2
50-100	75,4	0,0	0,0	32,2
> 100	20,8	12,0	0,0	0,0
Árboles muertos	10,2	4,7	0,1	0,5
TOTAL ÁRBOLES	169,3	105,3	79,7	121,0
Madera muerta (cm diámetro)				
< 0,64	0,1	0,2	0,1	0,2
0,64 -2,54	1,0	1,5	0,5	0,8
2,54-7,7	6,2	6,1	0,6	0,9
> 7,6 – duro	11,2	9,7	1,8	12,7
> 7,6- podrido	1,4	0,0	0,2	4,0
TOTAL	20,0	17,4	3,2	18,6
Hojarasca	T	T	T	T
Plántulas	T	T	T	T
TOTAL AÉREO	189,3	122,7	83,7	139,6
Raíces	145,2	80,0	43,0	60,2
Suelos (cm profundidad)				
0-10	53,4	62,7	16,9	28,0
10-30	66,1	65,4	33,9	56,5
30-50	85,5	87,6	28,7	57,4
50-100	206,5	199,9	71,9	156,3
> 100	320,3	105,0	287,5	761,0
TOTAL SUBTERRÁNEO	877,0	600,1	481,8	1119,4
TOTAL RESERVA	1066	723	566	1259
CO₂e ECOSISTEMA	3912	2653	2074	4621

5. Referencias

- Adame, M.F., J.B Kauffman, I. Medina, J.N. Gamboa, O. Torres, J. Caamal, J. A. Herrera-Silveira (2013). Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. PLoS ONE. 8: e56569.
- Adame, M.F., A. Zaldivar-Jimenez, C. Teutli, J.P. Caamal, M.T. Andueza, H. Lopez-Adame, R. Cano, H.A. Hernandez-Arana, R. Torres-Lara, J.A. Herrera-Silveira (2012). Drivers of mangrove litterfall in a karstic region affected by frequent hurricanes. Biotropica.
- Adame, M.F., D. Virdis, C.E. Lovelock (2010). Effect of geomorphological setting and rainfall on nutrient exchange in mangroves during tidal inundation. Marine and Freshwater Research 61: 1197-1206
- Burton, A.J. y K. S. Pregitzer. Measuring forest floor, mineral soil, and root carbon stocks. Pages 129-142 In: Hoover, C.M. (ed). Field measurements for forest carbon monitoring. Springer. Nueva York 240 p.
- Chave, J. C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.-P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra, T. Yamakura, 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia 145: 87-99.
- Caamal, J. 2012. Almacenes de carbono en manglares de Celestún, Yucatán. Tesis Maestría, CINVESTAV, Mérida, México. pp 55.
- Cintrón G, Schaeffer Novelli Y (1984) Methods for studying mangrove structure. En: Snedaker SC, Snedaker JG, editors. The Mangrove Ecosystem: Research Methods. París, Francia: UNESCO. pp. 91–113
- Clough, B.F. y K. Scott. 1989. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. Forest Ecology and Management. 27:117-127.
- CONABIO, 2009. Manglares de México: extensión y distribución. 2ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 99 pp.
- Dean, W.E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. Journal of Sedimentary Petrology. 44: 242-248
- Giesen W, Wulffraat S, Zieren M, Scholten L (2007) Mangrove guidebook for Southeast Asia. Food and Agricultural Organisation & Wetlands International, Bangkok, Tailandia, 769 pp.
- GOFC-GOLD, 2009. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting. GOFC-FOLD report version COP14-2, GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canadá. Disponible en: <http://www.gofcgold.uni-jena.de/redd/index.php>.
- Heiri O, Lotter AF, Lemcke G (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of paleolimnology 25: 101–110
- Hidayat, S. y W.T. Simpson, 1994. Use of green moisture content and basic specific gravity to group tropical woods for kiln drying. Research Note FPL-RN-0263, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Hughes, R.F., J. B. Kauffman y V. J Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. Ecological Applications. 10:515-527.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good practice guidance for land use, land-use change, and forestry. Eds. Penman, J. *et al.* Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa (2003).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 Guidelines, Volumen 1 y volumen 4 (Agriculture, Forestry, & Other Land Use), Anexo 2 (Summary of Equations).
- Jaramillo V. J., Hernández R. y Kauffman J.B. 2003a. Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: changes with secondary succession and forest conversion to pasture. Journal of Tropical Ecology (2003) 19:457–464.
- Jaramillo, V. J., J. B. Kauffman, L. Rentería-Rodríguez, D. L. Cummings y L. J. Ellingson. 2003b. Biomass, carbon, and nitrogen

- pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems*. 6: 609-629.
- Kauffman, J. B., D. L. Cummings, D. E. Ward y R. Babbitt. 1995. Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia*. 104:397-408.
- Kauffman, J. B. y T. Cole. 2010. Micronesian mangrove forest structure and tree response to a severe typhoon. *Wetlands*.
- Komiyama, A., J. E. Ong y S. Pongpan, 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89: 128-137.
- Kristensen, E. y Andersen, F.Ø. Determination of organic carbon in marine sediments: a comparison of two CHN-analyzer methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 109: 15-23
- Pearson, T. S. Walker, S. Brown, 2005. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. Report from BioCF and Winrock International., available at: <http://www.winrock.org/ecosystems/tools.asp?BU=9086>.
- Pearson, T.R.H., S.L. Brown, R.A. Birdsey, 2007. Measurement guidelines for the sequestration of forest carbon. General Technical Report-NRS-18, USDA Forest Service, Northern Research Station.
- Robertson G.P., D.C. Coleman, C.S. Bledsoe y P. Sollins. (eds). 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press. Nueva York. 462p.
- Robertson, A.I. y P.A. Daniel. 1989. Decomposition and the annual flux of detritus from fallen timber in tropical mangrove forests. *Limnology and Oceanography*. 34: 640-646.
- Ross MS, Ruiz PL, Telesnicki GJ, Meeder JF (2001) Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (EE. UU.). *Wetlands Ecology and Management* 9: 27–37.
- Saenger P. 2002 Mangrove ecology, silviculture, and conservation. Kluwer Academic Publishers. 360p
- Schumacher, B.A., 2002. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. NCEA-C- 1282, EMASC-001, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV, EE. UU.
- Simpson, W.T., 1996. Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods. RPL-RP-548, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Smith TJ, Whelan KRT (2006) Development of allometric relations for three mangrove species in South Florida for use in the Greater Everglades ecosystem restoration. *Wetlands Ecology and Management* 14: 409–419.
- Sparks y Bartels, 1996 D.L. Sparks y J.M. Bartels, *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, Soil Science Society of America, Madison (1996) pp. 1125–1131.
- World Agroforestry Centre. 2011. ICRAF Harvard Dataverse Network. <http://thedata.harvard.edu/dvn/dv/icraf>
- Zanne, A.E., López-González, G.*, Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C., y Chave, J. 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

Los *Documentos de trabajo* de CIFOR contienen resultados preliminares o avanzados de investigaciones relativas a problemas de los bosques tropicales, que deben ser publicados de manera oportuna. Son generados para informar y promover el debate. Su contenido ha sido revisado internamente pero no ha pasado el proceso más largo de la revisión externa por pares.

Este reporte describe la metodología necesaria para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono en bosques de manglar. Los manglares son ecosistemas costeros que proveen numerosos servicios que afectan tanto a recursos marinos como terrestres. Adicionalmente, los manglares contienen reservas de carbono considerables, que debido a altas tasas de deforestación, son fuentes significativas de carbono atmosférico. Debido a su valor como reservas y sumideros de carbono, así como numerosos beneficios, los manglares pudieran ser excelentes candidatos para participar en programas de mitigación de carbono incluyendo la Reducción de Emisiones debido a la Deforestación y Degradación Forestal en países en desarrollo (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, and Enhancing Forest Carbon Stocks in Developing Countries (REDD+)). Esta publicación presenta metodologías biológicamente relevantes y estadísticamente válidas para la medición eficiente y exacta de la estructura, biomasa y reservas de carbono en bosques de manglar.



PROGRAMA DE
INVESTIGACIÓN SOBRE
Bosques, Árboles y
Agroforestería

Esta investigación fue realizada por CIFOR como parte del Programa de Investigación de CGIAR sobre Bosques, Árboles y Agroforestería (CRP-FTA). El objetivo del programa es mejorar el manejo y uso de los bosques, la agroforestería y los recursos genéticos de los árboles a lo largo del paisaje, desde bosques hasta plantaciones. CIFOR dirige el programa CRP-FTA en asociación con Bioversity International, CATIE, CIRAD, el Centro Internacional de Agricultura Tropical y el Centro Mundial de Agroforestería.

cifor.org

blog.cifor.org



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR)

CIFOR impulsa el bienestar humano, la conservación ambiental y la equidad mediante investigación orientada a ayudar en el diseño de políticas y prácticas que afectan a los bosques de los países en vías de desarrollo. CIFOR es un miembro del Consorcio CGIAR. Nuestra sede central se encuentra en Bogor, Indonesia, y contamos con oficinas en Asia, África y América Latina.

