

Protocolo para la estimación de la dinámica del carbono forestal en sitios de medición intensiva: un enfoque multi-escala

Junio, 2015



Agradecimientos

Este documento es producto de una colaboración multi-institucional (gobierno, academia y ONGs) conformada en la Red Mexicana de Sitios de Monitoreo Intensivo del Carbono (Red Mex-SMIC), con el apoyo de los ejidos y comunidades dueñas de las tierras donde se han implementado los diseños de monitoreo del carbono aquí sugeridos. Queremos agradecer el apoyo financiero y asistencia técnica de los gobiernos de México, Noruega y EEUU a través de sus agencias de cooperación, así como del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

CONTENIDO

Acrónimos	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
REFERENCIAS	10
CAPÍTULO II. DISEÑO DE UN SITIO DE MEDICIÓN INTENSIVA DEL CARBONO.	12
REFERENCIAS	15
CAPÍTULO III. RESERVORIOS DEL CARBONO EN PARCELAS PERMANENTES	16
INTRODUCCIÓN	16
A. DISEÑO DE MUESTREO EN CAMPO.....	17
Establecimiento de parcelas permanentes	17
BIOMASA AÉREA.....	19
Individuos con diámetro normal entre 2.5 cm a 7.4 cm	19
Individuos con diámetro normal ≥ 7.5 cm.....	20
Individuos con diámetro normal ≥ 20 cm.....	21
Hierbas, arbustos y renuevos	21
MADERA MUERTA	21
Árboles muertos en pie	21
Tocones	22
Material leñoso caído.....	23
MANTILLO.....	24
Procesamiento de las muestras de mantillo	25
MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO.....	26
Procesamiento de las muestras de suelo	29
Determinaciones de la concentración de carbono orgánico en el suelo	30
BIOMASA SUBTERRÁNEA (RAÍCES).....	30
Métodos de muestreo de raíces.....	31
Consideraciones para elegir la metodología de muestreo.....	32
Muestreo y procesamiento de raíces.....	32
B. ESTIMACIÓN DE LOS RESERVORIOS DEL CARBONO FORESTAL	32
ESTIMACIÓN A NIVEL DE OBSERVACIÓN / MUESTRA	32
Biomasa aérea	32
Madera muerta	35

Mantillo	37
Suelo	37
Biomasa subterránea (raíces).....	38
ESTIMACIÓN A NIVEL DE PAISAJE.....	39
Densidad de carbono en la biomasa aérea	39
Cambio en la densidad de carbono en la biomasa aérea.....	42
Madera muerta	43
Estimación de los reservorios de carbono en los componentes subterráneos: mantillo, suelo y raíces	44
REFERENCIAS	44
CAPÍTULO IV. FLUJOS DEL CARBONO FORESTAL EN PARCELAS PERMANENTES.....	48
INTRODUCCIÓN	48
PRODUCCIÓN DE HOJARASCA.....	48
Diseño de muestreo	49
Trampas de hojarasca	51
Colecta de muestras y procesamiento en laboratorio	52
Cálculo de la producción de la hojarasca	52
PRODUCCIÓN DE RAÍCES.....	54
Extracción secuencial de núcleos de suelo.....	54
Núcleos de crecimiento interno	55
Minirizotrones	55
DESCOMPOSICIÓN DE MATERIAL FOLIAR Y DE RAMAS	57
Procesos y factores involucrados en la descomposición de la materia orgánica muerta.....	57
Descomposición del material foliar.....	58
Descomposición de ramas.....	61
MEDICIÓN DEL FLUJO DE CARBONO DEL SUELO	63
Métodos de medición del flujo de carbono del suelo.....	64
REFERENCIAS	66
CAPÍTULO V. ESTIMACIONES DE ALMACENES Y FLUJOS DEL CARBONO CON OTROS ENFOQUES.	70
Torres de Covarianza de Torbellinos	70
Equipo básico	72
Instalación de la torre.....	76

Manejo y mantenimiento de la torre	77
Descarga de datos	77
Procesamiento de los datos	78
Conclusiones y recomendaciones a futuro	81
SENSORES REMOTOS.....	82
Procesamiento de las imágenes ópticas	83
Procesamiento de datos LiDaR.....	83
Interpolación usando Modelos de Clasificación.....	84
Interpolación usando Regresión con kriging	85
Evaluación de los diferentes modelos de interpolación	86
MODELOS DE LA DINÁMICA DEL CARBONO	87
Tipos de modelos	87
Consideraciones del IPCC	88
Comentarios finales.....	90
REFERENCIAS	91
CAPÍTULO VI. INTEGRACIÓN.....	94
Paso 1) Representatividad.....	94
Paso 2) Determinar las causas de similitud y diferencia entre los datos/estimaciones	94
Paso 3) Métodos de integración	95
Efectos de perturbaciones.....	95
REFERENCIAS	96
CAPÍTULO VII. Perspectivas de los sitios de medición intensiva de carbono forestal.....	97
ANEXOS	99

ACRÓNIMOS

C. Carbono.

CBM-CFS3. Modelo de Balance de Carbono del Sector Forestal Canadiense (siglas en inglés).

CENTURY. Modelo general del ciclo de nutrientes.

CIS. Carbono inorgánico del suelo.

CH₄. Metano.

CO. Carbono orgánico.

CO₂. Bióxido de carbono.

CO₂FIX. Modelo de fijación de carbono.

CONAFOR. Comisión Nacional Forestal.

CT. Covarianza de torbellinos.

COS. Carbono orgánico del suelo.

DN. Diámetro normal (a 1.3 m de altura).

DNDC. Modelo de procesos sobre la biogeoquímica del carbono y nitrógeno (siglas en inglés).

ER. Estimadores de razón.

FullCAM. Modelo integrado de contabilidad de carbono de Australia (siglas en inglés).

GEI. Gases de efecto Invernadero.

H₂O. Agua.

INFyS. Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México.

IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en inglés).

IRGA. Analizador de gas en infrarrojo (siglas en inglés).

LIDAR. Técnica de alcance y recepción de luz (Light detection and ranging).

MAD-Mex. Sistema nacional de monitoreo de datos de actividad.

MLC. Material Leñoso Caído.

MM. Madera muerta.

MO. Materia orgánica.

MOS. Materia orgánica del suelo.

MRV. Monitoreo, Reporte y Verificación.

ONG. Organización no gubernamental.

PPNA. Producción Primaria Neta Aérea.

PVC. Policloruro de vinilo (siglas en inglés).

REDD+. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por deforestación y degradación forestal, conservación, y manejo forestal sustentable.

Red Mex-SMIC. Red de Sitios de Monitoreo Intensivo del Carbono.

RMSE. Error cuadrático medio.

R^2 . Coeficiente de determinación.

SMIC. Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono.

TCT. Torre de covarianza de torbellinos.

UMP. Unidad de muestreo primaria.

UMS. Unidad de muestreo secundaria.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Marcela Olguín, Craig Wayson, Richard Birdsey

A nivel mundial, los gobiernos de diversas naciones dirigen esfuerzos para mejorar la comprensión del papel de los bosques en la regulación del clima, así como en el diseño y evaluación de estrategias que desde el sector forestal puedan contribuir a la mitigación de los efectos negativos del cambio climático (Nabuurs *et al.* 2007, Canadell y Schulze 2014, Smyth *et al.* 2014). Los ecosistemas forestales, además de proveer una diversidad de bienes y servicios ambientales a las sociedades como el agua y la biodiversidad (Constanza *et al.* 1997, 2014), tienen la capacidad para remover grandes cantidades del dióxido de carbono (CO₂) que está acumulado en la atmósfera. En las dos últimas décadas, la absorción del CO₂ por el crecimiento de los bosques, fue equivalente a un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por la quema de combustibles fósiles, principal actividad causante del cambio climático global (Pan *et al.* 2011). Sin embargo, actividades como la deforestación y la degradación forestal también contribuyeron con importantes pérdidas del carbono almacenado, particularmente en los bosques tropicales, lo que significó cerca del 12-15% de las emisiones globales de CO₂ de origen antropogénico (van der Werf *et al.* 2009).

Con el fin de cumplir con los requerimientos nacionales e internacionales sobre la contabilidad y la reducción de las emisiones del CO₂ y otros GEI, varios países desarrollan sistemas de monitoreo, reporte y verificación (MRV) del carbono forestal. Existen diferentes maneras de obtener información sobre los cambios en los almacenes de carbono y sus correspondientes flujos de GEI. En función de la complejidad del sistema de monitoreo y del tipo de análisis que se utilice, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por su siglas en inglés) distingue tres niveles o Tiers (Maniatis y Mollicone 2010): a) Tier 1, tiene la mayor incertidumbre por basarse en valores agregados o datos por *de facto* proporcionadas por el IPCC (e.g. factores de emisión por biomasa); b) Tier 2, los países presentan estimaciones sobre flujos de GEI

y valores asociados de incertidumbre a partir de datos específicos de sus territorios; y c) Tier 3, el de menor incertidumbre, las estimaciones se basan en mediciones frecuentes y directas de los diferentes reservorios de carbono y sus cambios, generados mediante datos de inventarios detallados y el uso de modelos para la simulación de la dinámica del carbono (IPCC 2006, Birdsey *et al.* 2013).

En México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) diseña e implementa un sistema nacional de MRV asociado al carbono forestal. La finalidad de este sistema es el proveer estimaciones transparentes, consistentes, comparables, completas y exactas, que den certidumbre al reporte de emisiones de GEI derivadas de acciones de mitigación, como la reducción de la deforestación y degradación forestal, así como a la conservación y manejo forestal sustentable (REDD+). El sistema se basa principalmente en la colección y análisis de datos derivados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), así como de un sistema de monitoreo satelital que permita reportar los flujos de GEI a un nivel intermedio de incertidumbre o Tier 2. Sin embargo, para evaluar el éxito de las acciones de mitigación, el sistema debe integrar información proveniente de diversas fuentes y niveles de resolución en espacio y tiempo. Es por ello que la CONAFOR también colabora con socios estratégicos para la prueba de enfoques de medición y monitoreo a nivel sub-nacional, regional, y local, que le permitan, en la medida que sea práctico para el país, avanzar hacia el nivel de reporte de emisiones de GEI con menor incertidumbre o Tier 3.

Desde el 2012 la CONAFOR, a través del proyecto “Fortalecimiento REDD y Cooperación Sur-Sur”, impulsa un esfuerzo dirigido a proveer elementos clave para el desarrollo de un MRV multi-escala, mediante la formación de la red mexicana de sitios de monitoreo intensivo del carbono (Mex-SMIC). En dicha red, participan integrantes de gobierno nacional e internacional, academia, ONGs, ejidos y comunidades, para la integración de información derivada de inventarios forestales, teledetección, datos de perturbaciones, medición de flujos de GEI en la interfaz atmósfera-vegetación, y de la modelación ecosistémica, en forma consistente con las Guías de Buenas Prácticas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

El presente documento, producto de esta colaboración multi-institucional, tiene por objetivo el proveer de información detallada sobre métodos para el monitoreo intensivo de la dinámica del carbono forestal en paisajes forestales estratégicos para REDD+ en México. En los siguientes apartados, se describen temas que van desde el diseño general de un sitio de monitoreo intensivo del carbono (SMIC), el diseño y establecimiento de las unidades de muestreo dentro del SMIC, la colecta y procesamiento de datos de campo, los pasos para la estimación de los principales reservorios de carbono (i.e. biomasa aérea y subterránea, madera muerta, mantillo, suelo mineral) y sus cambios, así como información sobre enfoques y herramientas disponibles (e.g. sensores remotos, modelos) que permitan inferir la información de los flujos del carbono desde escala local a la regional. Toda la información que se presenta en este documento, incluidos los formatos de colecta de datos de campo, así como los códigos en R para las estimaciones del carbono forestal, son el resultado de la experiencia obtenida al interior de la Red, a partir del establecimiento, o mejoramiento, y funcionamiento de cuatro SMICs desde el 2012. Si bien en el país existen otros documentos y guías sobre el estudio de la dinámica del carbono forestal, esperamos que el presente documento proporcione información útil a posibles colaboradores que deseen implementar sitios de monitoreo intensivo (dentro o fuera del país), partiendo de una visión jerárquica multi-escala y de largo plazo, en soporte a los sistemas nacionales de MRV del carbono en bosques.

REFERENCIAS

- Birdsey, R., G. Angeles-Perez, W.A. Kurz, *et al.* 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4: 519-537.
- Canadell, J.G. y E.D. Schulze. 2014. Global potential of biospheric carbon management for climate mitigation. *Nature Communications* 5: 5282.
- Costanza R., R. d'Arge, R. de Groot, *et al.* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Costanza, R., R. de Groot, P. Sutton, *et al.* 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26: 152-158.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2013. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. *Manual y procedimientos para el muestreo de campo*. CONAFOR. Zapopan, México.

- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. Hayama, Japan.
- Maniatis, D. y D. Mollicone. 2010. Options for sampling and stratification for national forest inventories to implement REDD+ under the UNFCCC. *Carbon Balance and Management* 5:9.
- Nabuurs, G.J., O. Masera, O., K. Andrasko, *et al.* 2007. Forestry. En: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Metz, B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, *et al.* 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988–993.
- Smyth, C. E., G. Stinson, E. Neilson, *et al.* 2014. Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences* 11: 3515–3529.
- van der Werf, G. R., D. C. Morton, R. S. DeFries, *et al.* 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geosci.* 2: 737-738.

CAPÍTULO II. DISEÑO DE UN SITIO DE MEDICIÓN INTENSIVA DEL CARBONO.

Marcela Olguín, Craig Wayson, Gregorio Ángeles

México es uno de los pocos países en los trópicos cuyo sistema de medición y monitoreo de gases de efecto invernadero (GEI) se basa en la combinación de un continuo Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS; CONAFOR 2013) e información de cambios de cobertura vegetal derivados de productos satelitales de alta resolución (MAD-Mex; Gerbhart 2014). Sin embargo, este sistema presenta retos para estimar con un buen nivel de precisión, los flujos anuales de GEI por cambios en los cinco reservorios del carbono forestal considerados por el IPCC y su relación con diversos procesos de perturbaciones (naturales o antropogénicas). Esta información es aún más limitada cuando se requiere de estimaciones a nivel sub-nacional, regional o local, las cuales corresponden a su vez, a la escala de implementación de varias de las actividades de mitigación que implementarán los gobiernos federal o estatal (e.g. REDD+). Una aproximación para resolver estos retos es la selección de áreas para el monitoreo intensivo del carbono o SMIC, en las cuales se puedan probar diferentes herramientas y enfoques para la medición detallada de la dinámica del carbono, al tiempo que la información generada pueda relacionarse con otros sistemas de monitoreo de procesos que ocurren a escala de paisaje o región (Birdsey *et al.* 2013).

Los sitios de monitoreo intensivo del carbono (*sensu* el enfoque empleado por Hollinger 2008), son áreas de aproximadamente 9 km² en las cuales se integra información de observaciones extensivas provenientes de inventario forestales y datos de sensores remotos, con mediciones intensivas como las generadas con las torres de covarianza de torbellinos sobre el intercambio directo de GEI entre atmósfera y la vegetación, o los de producción de hojarasca, descomposición de la materia orgánica muerta, entre otros experimentos en campo. La ventaja de este sistema de monitoreo jerárquico ("top-

down" y "bottom-up"), es que permite avanzar en el nivel de conocimiento de los procesos que más impactan en las emisiones y remociones de GEI en un paisaje en particular, mediante la comparación de información obtenida por diferentes enfoques de medición y análisis de forma costo-efectiva (Hollinger 2008, Birdsey *et al.* 2013).

En términos generales, el componente “bottom-up” en los SMICs consisten en una red de parcelas permanentes o unidades de muestreo primario, distribuidos de manera sistemática estratificada, en función de las condiciones ambientales y de perturbación que se quieren caracterizar (e.g. manejo forestal, degradación, conservación). En este caso la unidad de muestreo primaria o conglomerado, está formada por cuatro parcelas circulares de 400 m², dispuestos en forma de una "Y" invertida. Este tipo de parcelas es similar al utilizado en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR 2013), lo cual permite la extrapolación de una parte de las estimaciones generadas de los SMICs a nivel regional. De contar con una torre de covarianza de torbellinos, esta se coloca al centro del sitio, densificando el número de conglomerados dentro de la celda de un kilómetro cuadrado para calibrar y comparar las mediciones de flujos hechas por la torre. En la Figura 2.1 se presenta el diseño general de un SMIC, con su red de unidades de muestreo primarias y secundarias, así como una torre de covarianza de torbellinos al centro. En las unidades de muestreo de la Red Mex-SMIC, se colecta información dasométrica (e.g. diámetro y altura de los árboles por especie), estimaciones de los contenidos del carbono en materia orgánica muerta y en el suelo mediante colecta y análisis de muestras en laboratorio, además de la estimación de las tasas de crecimiento, recambio de la biomasa, caída de hojarasca y flujos de CO₂ del suelo.

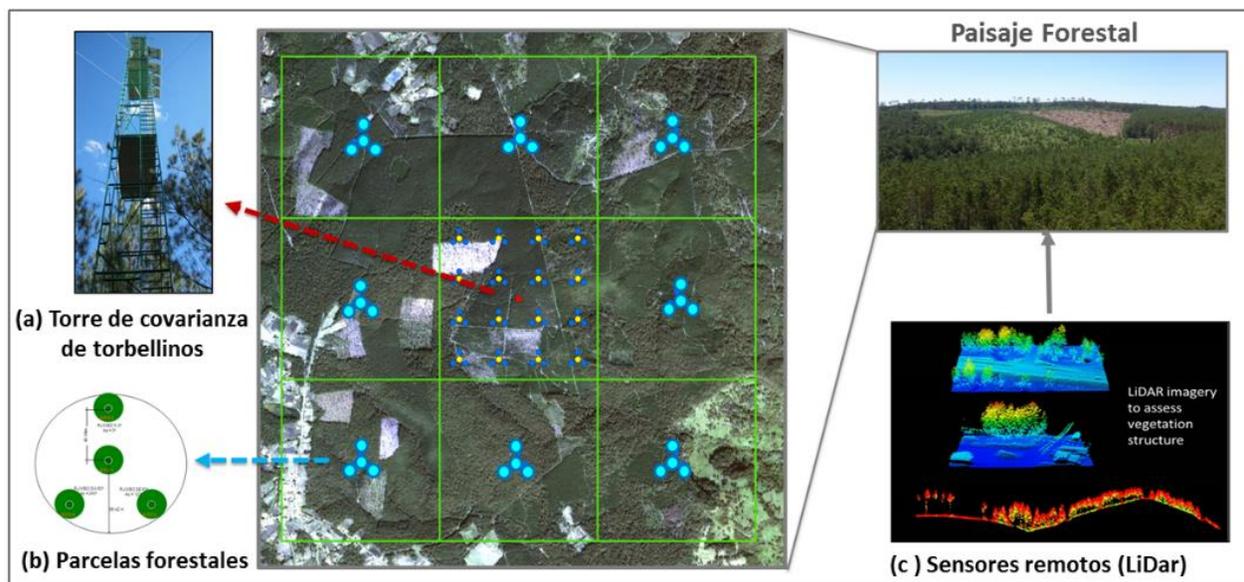


Figura 2.1. Representación del diseño espacial de un sitio de monitoreo intensivo de carbono de 3 x 3 km, en el cual se identifica: (a) la torre de Covarianza de torbellinos en el centro de 1 km², (b) las parcelas forestales y (c) otras herramientas (e.g. LiDAR) para inferir la información del estatus y la dinámica del carbono forestal a la región.

Con la información analizada de las parcelas permanentes, es posible calibrar y validar una diversidad de herramientas con las cuales inferir la dinámica del carbono a escala regional (componente “top-down”). Por ejemplo, a través de técnicas de la covarianza de torbellinos, de su vinculación con inventarios forestales estatales/nacional, sensores remotos y modelos de contabilidad del carbono forestal. En el Cuadro 1 se muestra el enfoque jerárquico-anidado empleado en los SMICs para el monitoreo de la dinámica del carbono forestal (adaptado de Hollinger 2008 y Birdsey et al. 2013). El nivel de los SMICs es el que contiene mayor cantidad de variables y con más detalle en la información colectada. Sin embargo, algunas de estas variables también se incluyen en el siguiente nivel de monitoreo (Inventarios forestales y sensores remotos), con lo cual se puede relacionar el conocimiento adquirido sobre procesos que ocurren en las escalas finas, con procesos que ocurren en escalas más gruesas, avanzando hacia la mejor comprensión del balance neto del carbono en ecosistemas forestales.

Cuadro 2.2. Variables de medición empleados en los sitios de monitoreo intensivo del carbono, con su homologación con el Inventario Nacional Forestal (i.e. INFyS) y sensores remotos (i.e. LiDAR). Adaptado de de Hollinger 2008 y Birdsey et al. 2013.

Variable	SMIC	INFyS	LiDAR
Tipo de vegetación/uso del suelo	X	X	X
Perturbaciones (naturales y antropogénicas)	X	X	X
Índice de área foliar	X	X	X
Estructura del bosque/composición de especies	X	X	X
Biomasa aérea (viva, muerta)	X	X	X
Mantillo, madera muerta, carbono orgánico en el suelo	X	X	
Crecimiento, reclutamiento, mortalidad y cosecha de biomasa aérea (tocones)	X	X	
Contenido y dinámica de crecimiento de biomasa subterránea	X		
Producción de hojarasca	X		
Flujos del suelo (CO ₂ /CH ₄)	X		
Intercambio neto del ecosistema	X		

REFERENCIAS

- Birdsey, R., G. Angeles-Perez, W.A. Kurz, *et al.* 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4: 519-537.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2013. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. *Manual y procedimientos para el muestreo de campo*. CONAFOR. Zapopan, México.
- Gebhardt, S., T. Wehrmann, M.A.M. Ruiz, *et al.* 2014. MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing* 6: 3923-3943.
- Hollinger, D. 2008. Defining a Landscape-Scale Monitoring Tier for the North American Carbon Program. En: *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Hoover, C. (Ed.) Springer-NY, USA. pp 3-16.

CAPÍTULO III. RESERVORIOS DEL CARBONO EN PARCELAS PERMANENTES

David López Merlín, Vanessa Maldonado, Craig Wayson, Oswaldo Carrillo, Juan Manuel Dupuy Rada, Gregorio Ángeles Pérez, Juan Pablo Caamal Sosa, Benjamín Méndez López, Gonzalo Sánchez Santos, Griselda Chávez Aguilar, Kristofer Johnson, Manuela Tamayo, Sebastián Puc

INTRODUCCIÓN

Como parte del enfoque “Bottom Up” que se emplea en un sitio de medición intensivo de carbono (SMIC) se establecen parcelas permanentes para obtener información que permita estimar cambios en los reservorios del carbono. El Cuadro 3.1 resume los reservorios del carbono de acuerdo a la Guía de Buenas Prácticas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2006), relativo a biomasa (aérea y subterránea), la materia orgánica muerta (mantillo y madera muerta) y suelo mineral.

Cuadro 3.1. Reservorios del carbono en bosques de acuerdo al IPCC (2006) y lo considerado en los SMIC.

	Biomasa aérea	Biomasa subterránea	Madera muerta	Mantillo	Materia orgánica del suelo (MOS)
IPCC	Biomasa de la vegetación viva, leñosa y herbácea, sobre el suelo; incluye tallos, ramas, corteza, semillas y follaje	Biomasa de las raíces vivas. Las raíces finas <2 mm de diámetro se excluyen porque no se distinguen del mantillo ni del suelo	Biomasa leñosa muerta no considerada en el mantillo o suelo; incluye madera sobre el suelo, raíces muertas y tocones (diámetro ≥ 10 cm)	Biomasa muerta con diámetro mayor a MOS y menor que madera muerta, en varios estados de descomposición, sobre o dentro del suelo. Incluye raíces de diámetro > 2 mm y < 10 cm.	Carbono orgánico en los suelos minerales (partículas < 2 mm). La profundidad de reporte del COS es definida por cada país
Red Mex-SMIC	Igual que el IPCC	Biomasa de raíces vivas y muertas	Biomasa leñosa muerta sobre el suelo, incluye tocones con diámetro ≥ 2.5 cm y ramas ≥ 0.5 cm	Biomasa muerta sobre el suelo > 2 mm, incluye ramas con diámetro <0.5 cm	Carbono orgánico en suelo mineral, hasta 30 cm de profundidad

A. DISEÑO DE MUESTREO EN CAMPO

Establecimiento de parcelas permanentes

Se consideran parcelas permanentes a aquellas que son medidas periódicamente (Silva *et al.* 1984). El diseño de estas parcelas, su distribución espacial y muestreo temporal,

son de gran importancia porque afectan la precisión y representatividad de las estimaciones, así como la capacidad para estimar la magnitud de la incertidumbre asociada (Honorio y Baker 2010).

En los SMIC existen unidades de muestreo primarias y secundarias, cuyos diseños y dimensiones son similares a las del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS, CONAFOR 2015; Figura 3.1), con el propósito de comparar las estimaciones del carbono derivadas del SMIC con el mismo tipo de bosque-ecoregión de este inventario, así como inferir estas estimaciones a otras escalas espaciales y temporales (mediante sensores remotos o modelos de contabilidad del carbono). Además, se pueden hacer recomendaciones para mejoras en el muestreo, procesamiento y análisis de datos del INFyS, e incrementar la muestra de los datos nacionales.

En este documento se llamará a las unidades de muestreo primarias “conglomerados”, y a las secundarias “parcelas”. Los principales elementos a considerar para su establecimiento en campo son: la ubicación del centro del conglomerado; el uso adecuado del equipo para determinar los rumbos y distancias; así como reconocer de manera precisa los límites de las parcelas compensando distancias por pendiente, debido a que de ello depende la definición de individuos incluidos en el muestreo (Anexo 3.1).

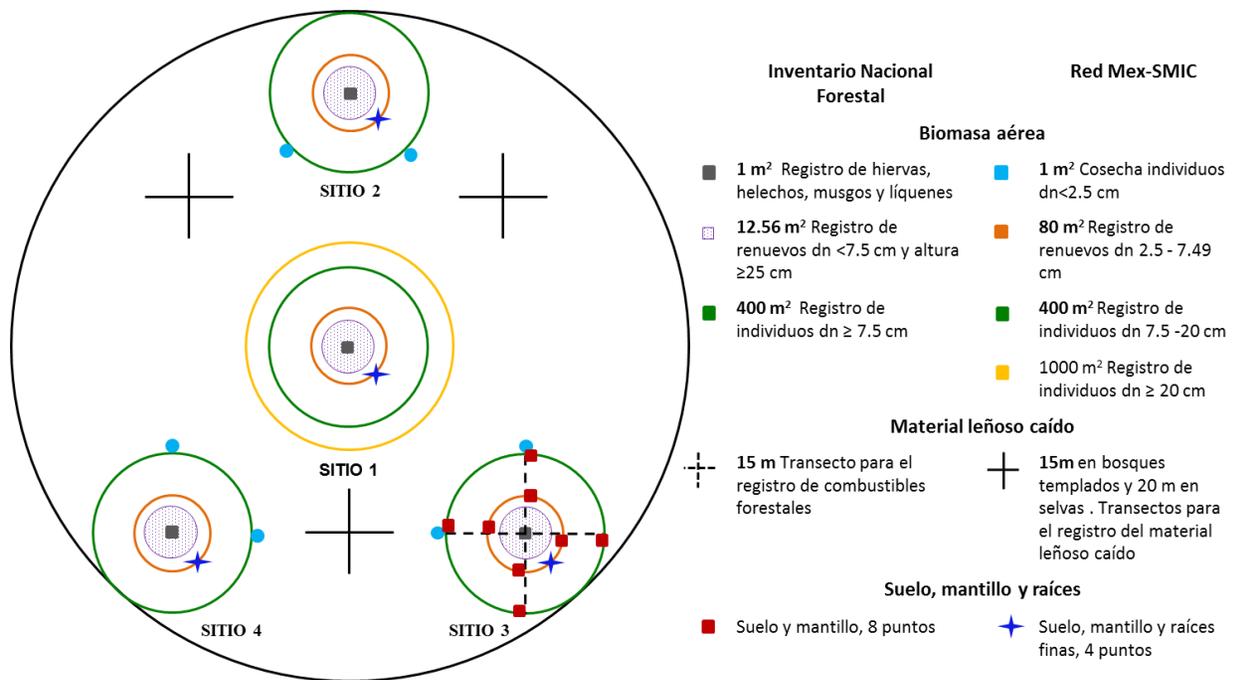


Figura 3.1 Comparación del diseño general del conglomerado o unidad de muestreo primario en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) y el Sitio de Medición Intensiva del Carbono (SMIC).

BIOMASA AÉREA

Individuos con diámetro normal entre 2.5 cm a 7.4 cm

La incertidumbre de las estimaciones de biomasa y volumen están asociadas al tamaño de la parcela; es decir, entre mayor sea su tamaño, menor será la incertidumbre o error de la estimación (Velasco 2003, Hernández 2014). En el diseño del INFYS, la vegetación menor a 7.5 cm de diámetro normal se registra en una parcela de 12.56 m², mientras que en el SMIC, la vegetación menor a 7.5 cm pero mayor a 2.5 cm se registra en una parcela de 80 m² (anidadas en las de 400 m²). Se considera que el tamaño de 80 m² de la parcela permite un balance entre el esfuerzo de muestreo en campo, la estimación de riqueza de especies y la estimación de la biomasa con la menor incertidumbre posible para la clase diamétrica mencionada.

Una vez delimitada la parcela, la numeración de las plantas se inicia con el individuo más cercano a la línea con rumbo norte (azimut 0°) a partir del centro de la parcela, y la

numeración continua en el sentido de las manecillas del reloj hasta completar los 360 grados (Figura 3.2). A cada individuo se le registra el nombre común, diámetro normal (Anexo 3.2), la altura total, la altura del fuste limpio, la longitud del tallo, el diámetro de la copa (diámetro mayor y menor) y su condición (vivo, muerto o tocón). En el caso de los árboles con una inclinación mayor a 45° respecto al suelo, se debe medir la longitud para evitar una subestimación de la biomasa del individuo (Anexo 3.3). El lugar donde se mide el diámetro normal del tallo se marca con pintura en aerosol de color llamativo y arriba de esta marca se coloca el número del individuo. Además, en un lugar visible se coloca una etiqueta para remediciones futuras. En caso de parcelas bajo aprovechamiento forestal maderable, se recomienda colocar la etiqueta en la base del tronco. Ver el formato de campo en el Anexo 3.4.

Individuos con diámetro normal ≥ 7.5 cm

Los individuos con diámetro normal ≥ 7.5 cm se registran en las parcelas de 400 m^2 , siguiendo los mismos lineamientos que en el caso anterior.

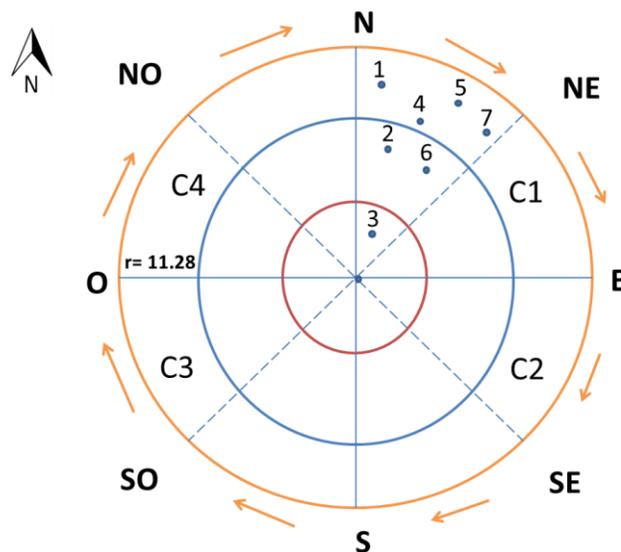


Figura 3.2 Orientación a partir del centro del sitio de 400 m^2 para la medición y registro de los árboles. Imagen: Gonzalo Sánchez Santos.

Individuos con diámetro normal ≥ 20 cm

Siguiendo lo mencionado por Velasco (2003) y Hernández (2014), en los SMIC se establecen áreas de 1000 m² en la parcela 1 del conglomerado en las que están anidadas las parcelas de 400 y 80 m².

Los individuos con diámetro normal ≥ 20 cm se registran en el área de 1000 m² (ver Figura 3.1). Los individuos se contabilizan y registran como en los casos anteriores.

Hierbas, arbustos y renuevos

El muestreo de las hierbas, arbustos y renuevos con diámetro normal <2.5 cm se realiza en parcelas de 1 m² (Figura 3.1). Todas las plantas enraizadas al interior de estas parcelas se cosechan, se separan por forma de vida (hierbas, árboles, arbustos, palmas y lianas), se secan y pesan para obtener la biomasa por parcela (Martínez y Sarukhán 1993, Gómez 2008, Walker *et al.* 2009, Anexo 3.5). Para la identificación de las formas de vida, es importante el apoyo de los brigadistas locales y taxónomos de campo. Cuando la cosecha de lianas se dificulta, porque sus ramas están sobre otras plantas, sólo se les mide el diámetro normal (Anexo 3.6) para la determinación de su biomasa utilizando ecuaciones alométricas (ver sección estimación de los reservorios del carbono forestal). Los formatos para colecta de datos en campo y laboratorio se muestran en el Anexo 3.7. La vegetación menor a 2.5 cm de diámetro normal tiene densidades de individuos que varían según la edad del bosque o al tipo de manejo, por lo que se recomienda establecer las parcelas de 1 m² en todos los conglomerados del SMIC.

MADERA MUERTA

Árboles muertos en pie

En cada parcela de 80, 400 y 1000 m², se registran los individuos muertos en pie de acuerdo al diámetro normal (Anexo 3.2), y se clasifican de acuerdo a las siguientes clases de descomposición (Walker *et al.* 2009):

Clase 1. Árboles con ramas y ramillas que se parecen a un árbol vivo (excepto por la ausencia de hojas, Figura 3.3). Para confirmar que el árbol está muerto se pueden hacer cortes tangenciales a la corteza del árbol hasta ver que el xilema está seco.

Clase 2. Árboles que presentan ramas grandes y pequeñas hasta los que sólo tienen el tronco (Figura 3.3).



Clase 1



Clase 2

Figura 3.3 Clasificación de árboles muertos en pie clases 1 y 2. Fotos: Gonzalo Sánchez Santos.

Los datos de los árboles muertos en pie se registran en el formato de campo del arbolado (Anexo 3.4).

Tocones

Un tocón es un trozo de tallo con altura menor a 1.30 m, debido a perturbaciones naturales o aprovechamiento (CONAFOR 2015). Los tocones se miden en las parcelas de 80, 400 y 1000 m². Se registra el diámetro de la parte media del tocón y la altura total (Anexo 3.4).

Material leñoso caído

El material leñoso caído (MLC), son las piezas de madera muerta que están sobre el suelo y que pueden tener una altura de hasta 2 m, desprendidas de su base original, con un ángulo de inclinación respecto al suelo menor a 45° (Waddell 2002, Morfín *et al.* 2012, CONAFOR 2012). El MLC, no incluye árboles muertos en pie, tocones, follaje muerto ni cortezas separadas del tronco (Wadell 2002). El IPCC (2006) señala que el diámetro del MLC puede ser definido por cada país. En los SMIC, se clasifica de acuerdo a las siguientes categorías:

MLC grueso: piezas con diámetro ≥ 7.5 cm

MLC mediano: piezas con diámetro entre 2.5 y 7.4 cm

MLC fino: piezas con diámetro de 0.5 a 2.4 cm

Para el inventario de MLC en campo se utiliza el método de la línea de intersección o intersecciones planares. Éste consiste en el registro de datos de tallos intersectados por un plano vertical, para la estimación de biomasa (Warren y Olsen 1964, Van Wagner 1968, Morfín *et al.* 2012).

Para la colecta de datos se establecen 3 transectos en forma de cruz (“+”; Figura 3.4). La longitud de la línea de los transectos no es una medida constante. Se recomienda hacer un pre-muestreo en campo para identificar con qué longitud de línea se obtiene una estimación de biomasa con un porcentaje de error $\leq 20\%$ (UNAM *et al.* 2011). También se pueden usar valores de longitud de línea de la literatura que sean similares a la zona del SMIC.

Los datos que se registran en campo son el tipo de MLC (fino, mediano y grueso), la pendiente de la línea (en porcentaje), el diámetro de la pieza de MLC intersectado por la línea (Anexo 3.8) y la clase de descomposición de acuerdo a Wadell 2002. El formato de registro de datos de MLC se muestra en el Anexo 3.9. Es importante registrar la clase de descomposición del MLC (Anexo 3.10). En los sitios de monitoreo se pueden obtener muestras para caracterizar el contenido de carbono por tipo de MLC y clase de

descomposición. Para esto hay que considerar la representación de los tipos de condición o estratos por SMIC (e.g. por clases de edad, por tipo de manejo, etc.), los intervalos de diámetros del MLC y las clases de descomposición.

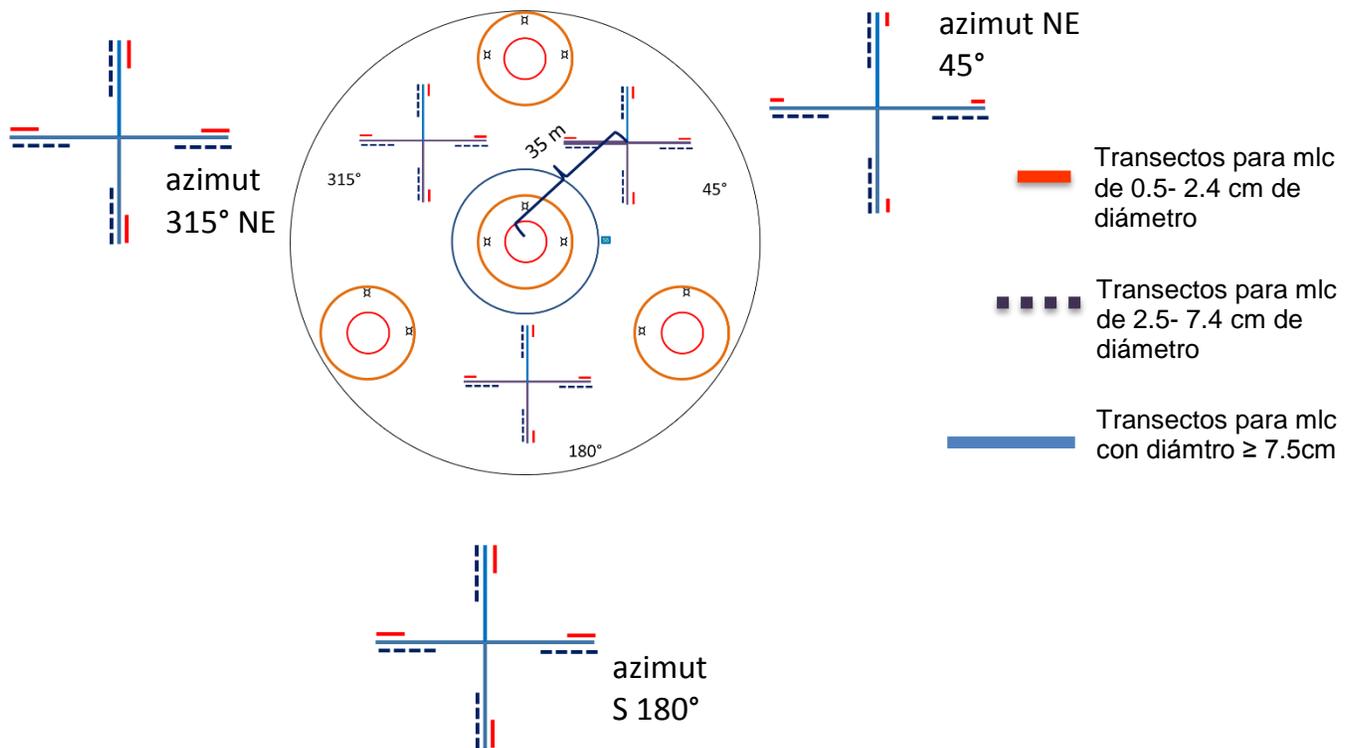


Figura 3.4 Ubicación de los transectos en forma de “+” para la colecta de datos de material leñoso caído. Imagen: Juan Pablo Caamal Sosa.

MANTILLO

Este componente se refiere a la biomasa muerta que se encuentra sobre el suelo, con un tamaño de partícula de 0.2 a 0.4 cm (límite de la madera muerta), e incluye raíces finas vivas <0.2 cm (IPCC 2006). Esta capa orgánica, puede dividirse a su vez en distintas sub-capas, que se diferencian dependiendo el grado de descomposición del material. El número de sub-capas varía dependiendo del tipo de ecosistema y la

temporada del año. Por ejemplo, puede haber más de una capa orgánica en ecosistemas templados, mientras que es menos frecuente encontrar más de una capa en ecosistemas húmedos y cálidos en donde la descomposición es más rápida.

Las tres capas orgánicas que se pueden reconocer son: 1) capa L (también nombrada horizonte Oi), caracterizada por ser material poco descompuesto y en donde se pueden identificar claramente los componentes (hojas, ramillas, frutos, etc.); 2) capa F (horizonte Oe), mantillo parcialmente descompuesto con estructuras vegetales aún reconocibles; y 3) capa H (horizonte Oa), materia orgánica en estado de descomposición muy avanzado, en esta capa no se puede identificar el origen del material (Burton y Pregitzer 2008).

La estimación del contenido del carbono en el mantillo requiere tener un número grande de muestras que permitan hacer una inferencia adecuada debido a su gran variabilidad espacial. En el caso de los SMIC se establece un punto de muestreo de mantillo, cuyas dimensiones son de 900 cm² (30 x 30 cm), en cada parcela de 400 m² en todos los conglomerados del paisaje que se quiere representar.

Los materiales y herramientas que se necesitan en el muestreo de mantillo se muestran en el Anexo 3.11. El procedimiento de colecta en campo se detalla en el Anexo 3.12. El formato para el registro de los datos de campo se muestra en el Anexo 3.13.

Procesamiento de las muestras de mantillo

El material colectado en campo se seca inmediatamente para evitar su descomposición. Si no se tiene disponible un horno adecuado para su secado, se puede utilizar un horno rústico con lámparas incandescentes o se pueden airear las muestras abriendo las bolsas y colocándolas en un lugar seco, ventilado y limpio. En la Figura 3.5 se presentan los detalles de su procesamiento en el laboratorio.

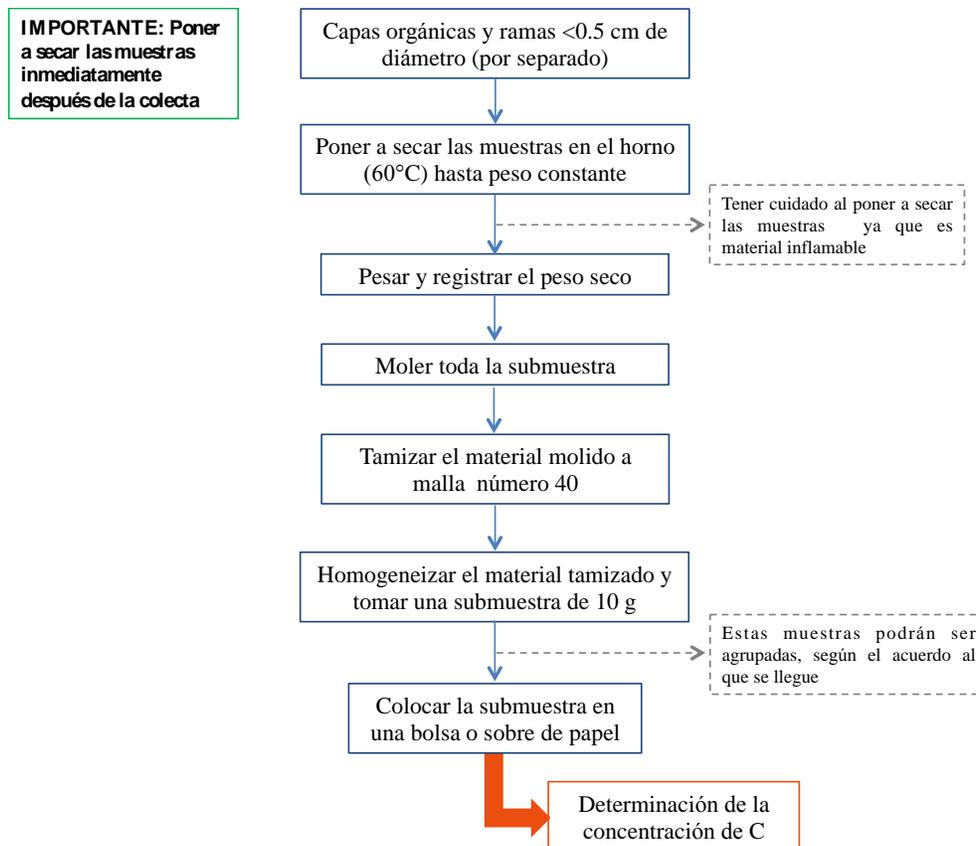


Figura 3.5 Procedimiento para el manejo de muestras de mantillo en laboratorio.

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

De acuerdo con los lineamientos de la Guía de Buenas Prácticas del IPCC (2006), se considera como carbono en la materia orgánica del suelo a todo el carbono presente en los suelos minerales, incluyendo raíces finas vivas y muertas, que no se pueden distinguir de manera empírica de la parte mineral. Las estimaciones del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) conllevan altos niveles de incertidumbre debido a su gran variabilidad espacial. Por esto, para representar de manera adecuada la variabilidad del COS se pueden hacer ejercicios de estimación del número mínimo de muestras para dicha variable, empleando datos previos generados en el sitio de interés o datos de variables relacionadas, como la concentración de materia orgánica del suelo.

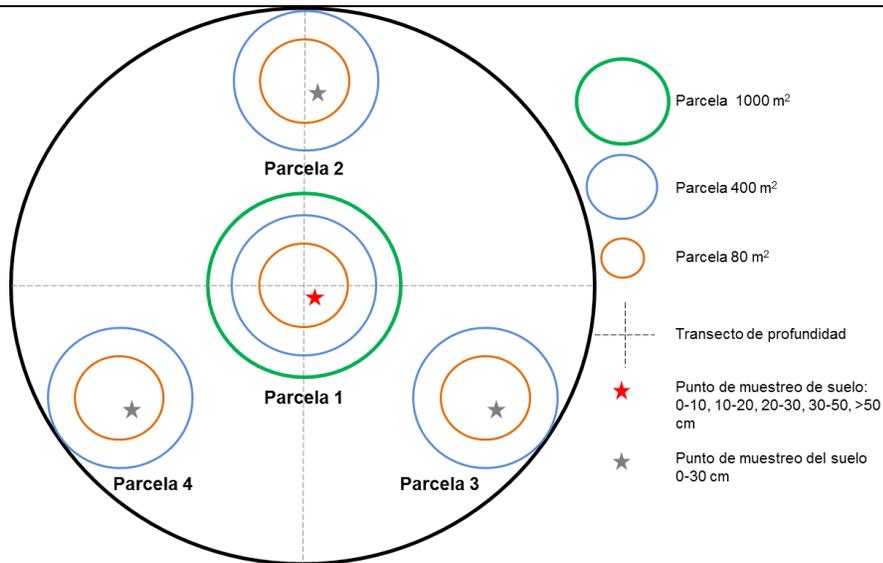
En los SMIC, es recomendable seguir un diseño de muestreo sistemático para tener una representación del COS a nivel del paisaje. Además, las unidades de muestreo dentro de la parcela deben distribuirse de tal manera que permitan la comparación de las estimaciones y recomendaciones a inventarios forestales estatales y nacionales.

La densidad aparente del suelo se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen del suelo y considera los espacios porosos y los sólidos, y es importante para calcular el COS. Para la toma de muestras de suelo y con éstas la medición de la densidad aparente, hay tres principales métodos: el del terrón, el núcleo y el de excavación (Anexo 3.14). Cada uno conlleva ventajas y desventajas. Por ejemplo los dos primeros métodos no son adecuados para suelos pedregosos, ya que subestiman la fracción gruesa (>2 mm), lo que puede resultar en la sobreestimación del contenido de COS. El método de excavación, a pesar de que proporciona medidas de la masa del suelo más precisas, es menos replicable por el esfuerzo que se requiere para la toma de las muestras, además que impacta fuertemente el sitio de muestreo (Vadeboncoeur *et al.* 2012). Cualquiera que sea el método elegido, es necesario tomar las muestras con el mayor cuidado posible, ya que de ello depende la precisión del resultado.

Por las características de inventarios intensivos en los SMIC se utiliza el método de excavación en un área de 900 cm² (marco de 30 x 30 cm) y a una profundidad de 30 cm, que es la recomendada por el IPCC (2006). Sin embargo, es recomendable conocer la distribución del COS en diferentes profundidades. En los SMIC, se puede combinar una estrategia de muestreo detallado y grueso en cuanto a profundidades. Para el primer caso se establece un punto de muestreo en la parcela 1 del conglomerado. En este punto se obtienen muestras a las siguientes profundidades: 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 y >50 cm. Si los recursos humanos y económicos lo permiten, el muestreo a una profundidad >50 cm puede hacerse cada 20 cm. Para el muestreo grueso se obtiene una muestra de 0-30 cm de profundidad en las parcelas 2,3, y 4 del conglomerado (Figura 3.6). Para el caso de los SMIC en México esta distribución de los puntos de muestreo y profundidades permite hacer recomendaciones al INFyS, por la

comparación a la profundidad de 0-30 cm y la mayor distribución de los puntos de muestreo en todo el conglomerado.

Figura 3.6 Ubicación de los puntos de muestreo de suelo en la Unidad de muestreo primaria o conglomerado.



Ubicar un punto de muestreo de suelo por parcela (indicados por estrellas). En al menos uno de los puntos realizar el muestreo de suelo a detalle, con colectas a cada 10 cm, y a mayor profundidad total que los otros puntos. En el resto de las parcelas tomar muestras de 0-30 cm de profundidad. Si el muestreo de suelo se realiza junto con otros componentes (i.e. biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta o mantillo), realizarlo en todos los conglomerados.

Además se puede hacer una exploración de la distribución de la profundidad del suelo al interior del conglomerado. Para esto, se trazan cuatro líneas desde el centro del mismo con dirección norte, sur, este y oeste, a lo largo de las cuales se registra a cada 5 metros de distancia la profundidad del suelo con una varilla graduada. El procedimiento de muestreo de suelo en campo se detalla en el Anexo 3.15. Los formatos para el registro de los datos colectados en campo y los analizados en el laboratorio están en el Anexo 3.16.

Procesamiento de las muestras de suelo

Posterior a la colecta en campo, se requiere de un procedimiento cuidadoso en laboratorio. En el laboratorio las muestras se dividen en dos vías: 1) para determinar el contenido de humedad del suelo, lo que permite asignar un peso de la fracción fina del suelo con una base en seco; y 2) la preparación de la muestra para la determinación de la concentración de carbono, la cual debe ser lo más representativa posible.

El tamizado y la molienda del suelo son una parte clave del proceso. Es recomendable moler los agregados del suelo en un mortero de porcelana o con ayuda de un mazo de madera, ya que toda la muestra pasar por el tamiz, para evitar sesgar la muestra al elegir solo las partículas finas. Los detalles del procedimiento en laboratorio se muestran en la Figura 3.7

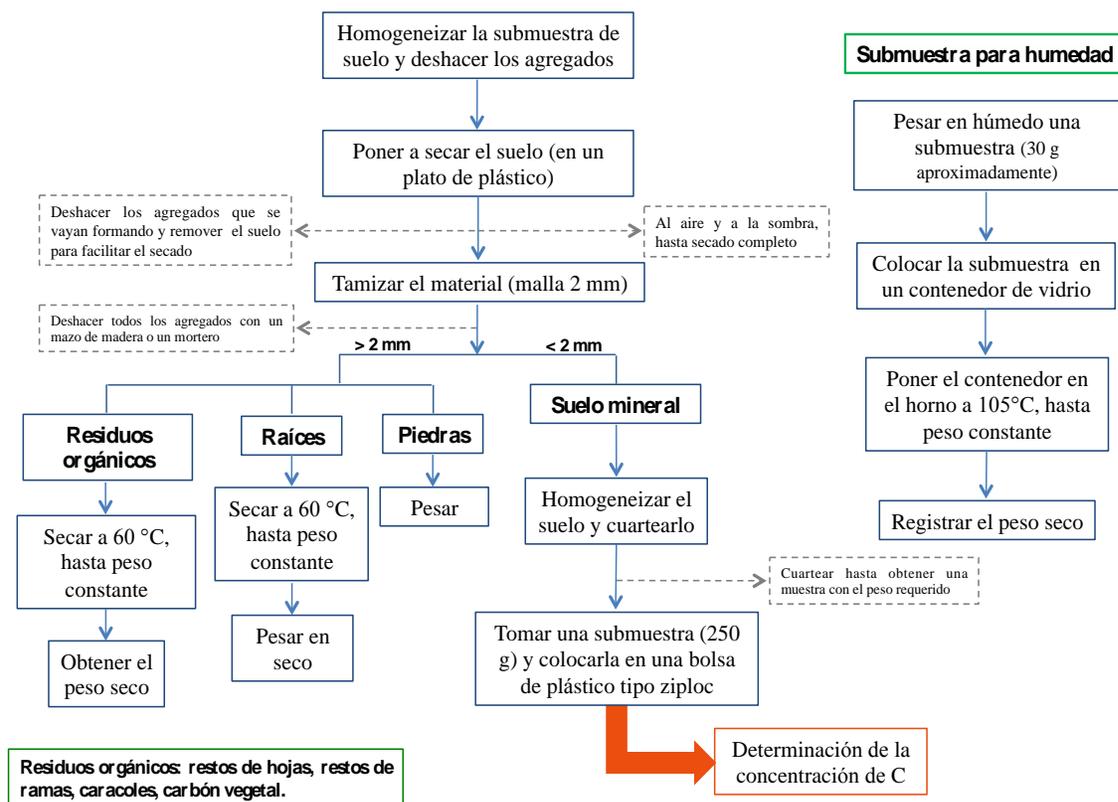


Figura 3.7 Procedimiento para el manejo de las muestras de suelo en el laboratorio.

Determinaciones de la concentración de carbono orgánico en el suelo

El tener datos locales y precisos del contenido de carbono en el suelo es vital para reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones de emisiones/remociones de GEI en el suelo. Hay distintas técnicas para la determinación o estimación del carbono orgánico del suelo; los más simples son los basados en la cuantificación de la materia orgánica, ya sea por combustión húmeda (Walkley y Black 1934) o por incineración (Davies 1974). Los métodos directos son aquellos automatizados por combustión seca, con aparatos sofisticados, los cuales son más caros, pero con una mayor precisión (Hobley y Willgoose 2010). Aunque los métodos automatizados son más costosos, se recomienda utilizarlos, para obtener datos más precisos que nos ayuden a conocer la variación en la concentración de carbono en el suelo.

BIOMASA SUBTERRÁNEA (RAÍCES)

La biomasa en raíces es uno de los compartimentos más relevantes en los ecosistemas terrestres porque afecta su desarrollo y funcionamiento (Xiao *et al.* 2003, Da-Lun *et al.* 2010). Por ejemplo, permite el anclaje de las plantas al sustrato, participa activamente en la absorción de agua y nutrientes (Pregitzer 2002, Trumbore y Gaudinski 2003, Da-Lun *et al.* 2010) y en la formación de asociaciones simbióticas con hongos y otros organismos del suelo (Bardgett *et al.* 2014). Paralelamente, representa una de las principales vías de transferencia del carbono hacia el suelo e influye en la actividad microbial y en los procesos de descomposición (Janssens *et al.* 2002). La biomasa radical representa aproximadamente el 38% de la biomasa total del ecosistema, contribuye entre 30 y 50% del carbono ciclado anualmente (Vogt *et al.* 1996, Makkonen y Helmisaari 1998, Janssens *et al.* 2002, Persson 2002) y 33% de la producción primaria neta anual global en algunos bosques (Jackson *et al.* 1997, Vogt *et al.* 1998, Da-Lun *et al.* 2010). A pesar de la importancia que juega la biomasa radical en el funcionamiento de los ecosistemas, se carece de información detallada sobre ésta (Dixon *et al.* 1994, Vogt *et al.* 1996, Vogt *et al.* 1998). Una de las principales razones es la dificultad del muestreo en campo (Vogt *et al.* 1998, Madji *et al.* 2005).

Existen diversas metodologías para medir variables específicas de las raíces: el peso, la longitud, el crecimiento, la producción, la descomposición, entre otras (Vogt y Persson 1991). Sin embargo, la mayoría de estas metodologías no están estandarizadas lo que dificulta la comparación de los resultados (Campbell *et al.* 2002, Madji *et al.* 2005). Por ejemplo, algunas aumentan el nivel de incertidumbre en las estimaciones debido a que los muestreos generan cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, o bien porque son muy intensivos, laboriosos y requieren de mucho tiempo para su procesamiento (Hirano *et al.* 2009, Osawa y Aisawa 2012). La mayoría de los estudios sobre raíces (principalmente finas) recurren a la utilización de los estándares o promedios internacionales, para referir la biomasa de las raíces como una relación con la parte aérea del ecosistema (Persson y Stadenberg 2009), sin embargo ésta relación no siempre resulta adecuada.

Métodos de muestreo de raíces

Una amplia variedad de metodologías (directas e indirectas) han sido desarrolladas para estimar la dinámica del sistema radical en los ecosistemas forestales (Vogt *et al.* 1996, Vogt *et al.* 1998, Osawa y Aisawa 2012). Las principales metodologías son directas: extracción secuencial de núcleos de suelo (Ostonen *et al.* 1999), núcleos de crecimiento interno (Finèr *et al.* 1997, Ostonen *et al.* 1999), rizotrones (Hendrick y Pregitzer 1993, Majdi y Öhrvik 2004) y minirizotrones (Vogt *et al.* 1998, Polomski y Khun 2002).

Las metodologías de excavación se usan para explorar las características morfológicas, la arquitectura o biomasa del sistema radical de individuos. Los parámetros que se pueden obtener son: biomasa, crecimiento, longitud, diámetro, peso, volumen, producción, etc., relacionados por unidad de área o de volumen (Polomski y Kuhn, 2002). Para cuantificar la biomasa de las raíces (principalmente finas), estas metodologías pueden subestimarla, dado que durante el proceso se puede perder una cantidad considerable de raíces. Otra desventaja de estas metodologías es que generan mayor disturbio al momento de tomar la muestra.

Los minirizotrones se emplean para obtener información sobre la dinámica de las raíces en periodos largos; se considera una metodología no destructiva ya que solo se perturban las condiciones al momento de colocar el minirizotróon (Smucker *et al.* 1987, Vogt *et al.* 1998).

Consideraciones para elegir la metodología de muestreo

Diversos factores deben considerarse para la selección de la metodología, según el ecosistema y objetivo del estudio. La metodología seleccionada debe minimizar el disturbio del sistema radical si se va a dar seguimiento en el mediano y largo plazo para determinar la variabilidad estacional o interanual, además de considerar la fenología del sistema radical (Santantonio y Hermann 1985, Vogt *et al.* 1998).

Muestreo y procesamiento de raíces

En los SMIC se propone aprovechar el muestreo de suelos para cuantificar la biomasa de raíces. Al igual que el suelo y el mantillo, el muestreo de las raíces puede ser por unidad de área o volumen.

En los SMIC, se propone muestrear las raíces en el mismo hueco volumétrico del suelo. Es decir, en un área de 30 x 30 cm muestrear a una profundidad, según el procedimiento señalado en el Anexo 3.17 o acotar a la profundidad a la cual se encuentran distribuidas las raíces, según las características del ecosistema. El formato para la captura de datos de campo y laboratorio está en el Anexo 3.18.

B. ESTIMACIÓN DE LOS RESERVORIOS DEL CARBONO FORESTAL

ESTIMACIÓN A NIVEL DE OBSERVACIÓN / MUESTRA

Biomasa aérea

La estimación de biomasa aérea se hace a nivel árbol, después a nivel de parcela y posteriormente se escala a nivel paisaje. Previo a la estimación se debe realizar un

ejercicio de control de calidad de los datos. La experiencia del técnico de campo y la posibilidad de establecer un procedimiento automatizado para el control de calidad de los datos, permiten tener información confiable para realizar la estimación de biomasa aérea.

Control de calidad

Se recomienda enfocar la revisión de los datos en tres principales rubros: depuración taxonómica, estandarizar las bases de datos y revisar la información dasométrica (CONAFOR y PNUD 2014).

a) Depuración taxonómica

Para garantizar una correcta determinación taxonómica de los individuos que se muestrean en campo, es necesario apoyarse en personal calificado y con vasta experiencia en inventarios forestales de la región. Sin embargo, en el caso de los individuos cuyo nombre científico no puede ser determinado en campo, estos especímenes deben ser cotejados con una muestra para herbarios en los centros de investigación del área de influencia al SMIC. Garantizar la correcta determinación de los individuos medidos o colectados, y con los nombres científicos bien escritos, permite una correcta aplicación de las ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa.

b) Base de datos estandarizada

La base de datos debe tener el mismo número de caracteres y sin espacios en blanco en los nombres de los campos de captura. Además, debe tener asociado un diccionario de los nombres de los campos, para saber a qué se refiere el campo y sus unidades. Estas consideraciones facilitan el proceso de automatización del control de calidad en programas de análisis estadístico como R (R versión 3.1.3, The R foundation for statistical computing).

c) Información dasométrica

Se realiza a nivel de especie. En primer lugar es necesario identificar el conjunto de especies con un número de individuos suficiente (e.g. al menos 10) para emplear

métodos estadísticos automatizados. Esto permite identificar de manera sencilla y rápida posibles errores en los valores dasométricos reportados a nivel de individuo dentro de cada especie. En el caso de no tener un número suficiente de individuos, la depuración se realiza de forma manual. El proceso automatizado que se realiza en los SMIC en México se detalla en el Anexo 3.19.

Estimación de la biomasa a nivel de individuo

La estimación a nivel de individuo se realiza con ecuaciones alométricas. Éstas se pueden seleccionar considerando los siguientes criterios (enunciados en orden de importancia):

- 1) Elegir ecuaciones alométricas locales y luego regionales,
- 2) Usar ecuaciones por especie; de no haber, elegir para el mismo tipo de ecosistema,
- 3) Elegir ecuaciones alométricas que reporten el intervalo de diámetros con el que fue construida,
- 4) Elegir las ecuaciones que tengan el r^2 ajustado y el cuadrado medio del error (Picard *et al.* 2012, Andrade *et al.* 2014),

Es importante saber en qué unidades (kilogramos o toneladas) se reporta el resultado, Para calcular el reservorio de carbono por individuo, la biomasa de cada individuo se multiplica por la fracción de carbono 0.47 (IPCC 2006).

Estimación de la biomasa en elementos menores (parcela 1m²)

Para obtener la biomasa en las parcelas de 1 m² se suman los pesos secos en gramos por forma de vida para cada parcela. El peso total por parcela se divide entre 1000 para convertirlo a kilogramos.

Para estimar el reservorio del carbono en las parcelas de 1 m², la biomasa total en kilogramos se multiplica por la fracción de carbono 0.47 (IPCC 2006). Se pueden utilizar fracciones de carbono obtenidas en estudios reportados para la zona de influencia del SMIC.

Madera muerta

Control de calidad

Como primer paso es necesario revisar que las unidades de las variables y sus dimensiones sean correctas; para el caso de los árboles muertos en pie y tocones es importante revisar que no se registren como tocones, los árboles muertos en pie sin copa y con una altura superior a 1.3 m. Cuando se cuenta con datos de más de un año, se deben cotejar las bases de datos para que no haya árboles vivos registrados como árboles muertos en pie.

Árboles muertos en pie y tocones

Para la estimación de biomasa en árboles muertos en pie se puede utilizar ecuaciones de volumen para fuste limpio y para árbol total reportadas para la zona de trabajo. Para elegir las ecuaciones se siguen los mismos criterios mencionados en el apartado de biomasa aérea. Para convertir el volumen a biomasa, el volumen se multiplica por la gravedad específica determinada en laboratorio (peso seco/volumen verde o saturado de agua) de árboles muertos en pie o material leñoso caído expresada en kg m^{-3} . Si no se cuenta con dato de gravedad específica se puede usar datos de densidad de madera muerta.

Para los tocones se aplica la fórmula de Huber (Ugalde 1981):

$$V = L \times A$$

V= volumen del tocón (m^3)

L= Longitud de la pieza (m)

A=área de la parte media del tocón (m^2)

Para transformar a biomasa, el volumen se multiplica por la gravedad específica expresada en kg m^{-3}

Material leñoso caído

La estimación de la biomasa en material leñoso caído (MLC) por conglomerado se obtiene mediante la ecuación de Van Wagner (1982):

$$C = K \times GE \times \sum Dc \times c / L$$

Donde

C: Es la biomasa de MLC (t ha⁻¹)

K: Constante equivalente a 1.234, derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la biomasa de MLC en t ha⁻¹

Dc: Diámetro cuadrático, que es el diámetro intersectado elevado al cuadrado

GE: Gravedad específica de la madera (g cm⁻³)

L: Es la longitud del transecto (m)

c: Factor de corrección de la pendiente en una base horizontal, se calcula con la siguiente expresión:

$$c = 1 + \left(\sqrt{\% \text{ pendiente} / 100} \right)^2$$

Si en campo solo se registra la frecuencia de piezas finas o medianas por línea, la estimación de biomasa puede realizarse con la siguiente expresión:

$$C = K \times GE \times Dcp \times f \times c / L$$

C: Es la biomasa de MLC (t ha⁻¹)

K: Constante equivalente a 1.234, derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la biomasa de MLC en t ha⁻¹

Dc: Diámetro cuadrático, que es el diámetro intersectado elevado al cuadrado

GE: Gravedad específica o densidad específica de la (g cm⁻³)

f: Es el número de piezas para MLC fino o mediano encontradas en el transecto

c: Factor de corrección de la pendiente en una base horizontal, se calcula igual que la expresión arriba

L: Es la longitud del transecto (m)

Mantillo

Control de calidad

Es importante revisar que las unidades en las que se registran los datos sean las establecidas en el diseño. Revisar que los pesos secos sean menores a los pesos húmedos, al igual que los pesos de las submuestras sean menores a los de las muestras.

Contenido de carbono en el mantillo

Este se obtiene multiplicando el peso total de la muestra de mantillo por la concentración de carbono; si esta última está en porcentaje, será necesario multiplicar por el factor de 0.01, y así obtener los gramos de carbono por unidad de área (p. ej. 23 g C en 0.09 m², esta área es considerando un cuadro de 30 x 30 cm). Si el carbono se encuentra en proporción, no se requerirá ningún factor. Con la información a este nivel se procede con el cálculo a nivel de estrato o paisaje.

Suelo

Control de calidad

La revisión de los datos de suelo debe ser muy cuidadosa ya que el procesamiento considera muchos pasos:

1. Revisar que las unidades de todas las variables sean las definidas en el diseño.
2. Que todas las muestras que tienen dato de profundidad, tengan su correspondiente dato de peso de suelo y viceversa.
3. Que los valores de volumen sean los adecuados según las dimensiones del hueco.
4. Que el peso de la submuestra sea menor al de la muestra.
5. Que el peso en húmedo sea mayor al peso seco.

Para calcular el contenido de carbono en suelo por unidad de área de muestreo, es necesario contar con el dato de peso seco y la concentración de carbono de la fracción mineral. El peso seco deberá estar ajustado por el contenido de humedad del suelo, el

peso de las piedras y el peso seco de raíces y otros residuos orgánicos (i.e. fragmentos de materia orgánica, caracoles, carbón, y otros residuos orgánicos). Otra alternativa es usar los datos de densidad aparente, profundidad del suelo y concentración de carbono.

Contenido de carbono en el suelo

El contenido de carbono en el suelo se calcula multiplicando el peso total seco (de la fracción mineral) por la concentración de carbono por unidad de área. Si el dato de carbono está en porcentaje, es necesario multiplicar el dato anterior por un factor de 0.01 para obtener el dato en g C por unidad de área (p. ej. 68 g C en 0.09 m², el área considerando un cuadro de 30 x 30 cm). Con este dato se estima a nivel de paisaje; se convierte el dato de gramos de carbono a toneladas (dividiendo el dato entre 1,000,000), y el área de metros cuadrados a hectáreas (dividiendo el dato en m² entre 10,000); siguiendo el ejemplo quedaría . Una vez que se tiene estos datos, se hace la estimación a nivel de paisaje y por profundidad; en la sección “Estimación a nivel de paisaje” se detalla el procedimiento.

Biomasa subterránea (raíces)

Control de calidad

Para el control de calidad de los datos de raíces es necesario revisar que las unidades de las variables sean las definidas para el trabajo de campo y laboratorio (i.e. gramos o kilogramos por unidad de área). Una vez que se tiene el peso seco de las muestras y submuestras de raíces, de los distintos niveles de separación por tamaño de tamiz, clase diamétrica y condición (vivas y muertas), se obtiene el peso seco a nivel de unidad de área (punto de muestreo).

Al igual que en el caso del mantillo y el suelo, el cálculo del carbono en las raíces se obtiene con el peso seco y la concentración de carbono, por clase diamétrica o condición (viva y muerta), a nivel de punto de muestreo.

Contenido de carbono en las raíces

El carbono en las raíces se obtiene de multiplicar el peso total de las raíces en el punto de muestreo, por la concentración de carbono. Si esta última está en porcentaje, será necesario multiplicar por un factor de 0.01, y así obtener los gramos de carbono por unidad de área (p. ej. 4.5 g C en 0.09 m², esta área es considerando un cuadro de 30 x 30 cm).

ESTIMACIÓN A NIVEL DE PAISAJE

Densidad de carbono en la biomasa aérea

Arbolado con diámetro mayor a 2.5 cm

Una vez estimada la biomasa de los árboles vivos utilizando las ecuaciones alométricas de acuerdo a lo señalado en la sección B, esta información se agrega a nivel de parcelas de 80, 400 y 1000 m². Para ello, sólo es necesario sumar el carbono de los árboles que pertenecen a la misma parcela. Después de estimar la biomasa a nivel de parcela, el siguiente paso es obtener estimaciones del carbono a nivel de SMIC.

El diseño de muestreo de los SMIC, al igual que el del INFyS, sigue los criterios de aleatoriedad, distribución sistemática y homogeneidad en la densidad de muestreo. Bajo estos supuestos, Velasco (2003) sugiere utilizar el método de “*estimador de razón*” para obtener parámetros forestales (valor de una variable dasométrica por unidad de superficie) a partir de inventarios con este tipo de diseño.

La expresión del estimador de razón se muestra en la ecuación 1 (Ec (1)):

$$\hat{R}_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} y_{ik}}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ik}} \quad \text{Ec (1)}$$

Dónde:

\hat{R}_k = Estimador del reservorio de carbono de la clase k

y_{ik} = Reservorio de carbono total en la parcela i de la clase k

a_{ik} = Superficie muestreada en la parcela i de la clase k

n_k = Número total de parcelas en la clase k

El estimador de razón para los reservorios de carbono en los SMIC tiene una incertidumbre asociada. Para estimar esta incertidumbre, se siguieron las directrices del IPCC (2006) (ecuación2):

$$U_k = \frac{IC_k/2}{\bar{R}_k} \times 100 \quad \text{Ec (2)}$$

Dónde:

U_k : Incertidumbre del estimador de carbono de la clase k

\bar{R}_k : Estimador de carbono de la clase k

IC_k : Intervalo del estimador de carbono \bar{R}_k de la clase k

En la que el IC_k está en función de la varianza de \hat{R}_k (ecuación 3):

$$\hat{R}_k - 1.96 \sqrt{\hat{V}(\hat{R}_k)} \leq R_k \leq \hat{R}_k + 1.96 \sqrt{\hat{V}(\hat{R}_k)} \quad \text{Ec (3)}$$

El factor $\hat{V}(\hat{R}_k)$ de la esta está definida como se muestra en la ecuación 4 (Velasco-Bautista et al., 2003):

$$\hat{V}(\hat{R}_k) = \left(\frac{1}{n_k (n_k - 1) \bar{a}^2} \right) \left(\sum_{i=1}^{n_k} y_{ik}^2 - 2 \hat{R}_k \sum_{i=1}^{n_k} y_{ik} a_{ik} + \hat{R}_k^2 \sum_{i=1}^{n_k} a_{ik}^2 \right) \quad \text{Ec (4)}$$

Dónde:

\hat{R}_k , y_{ik} , a_{ik} y n_k se definieron previamente

En la ecuación 4, el valor de \bar{a} se estima con la siguiente ecuación:

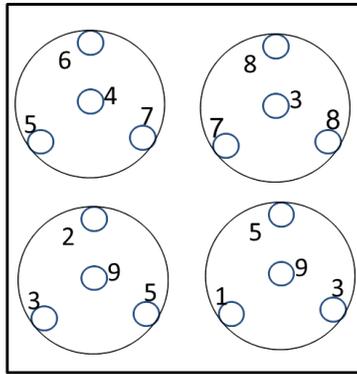
$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad \text{Ec (5)}$$

Dónde:

a_i = área de muestreo de la parcela

n = número de conglomerados del estrato k

El proceso de estimación de los estimadores de razón para un estrato hipotético que agrega 4 parcelas, se ejemplifica en la Figura 3.8



$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

$$\hat{R} = \frac{5 + 6 + 4 + 7 + 7 + 8 + 3 + 8 + 3 + 2 + 9 + 5 + 1 + 5 + 9 + 3}{0.04 \times 16}$$

$$\hat{R} = \frac{85}{0.64} = 132.8$$

Figura 3.8. Ejemplo del procedimiento para calcular el estimador de razón.

Como se puede observar en la ecuación 1 y en la Figura 3.8, el estimador de razón es la relación entre el valor total de una variable y el área total muestreada.

Una vez obtenido el estimador de razón para cada clase diamétrica (parcela de 80, 400 y 1000 m²), se estima el reservorio de carbono, ponderando el estimador de razón por el área del estrato (tipo de vegetación, edad, densidad de conglomerados en el SMIC, etc.) de interés o en su defecto por el área total del SMIC si no hay estratificación. En el Anexo 3.20 se describe el procedimiento automatizado en el programa R (R Core Team 2015), para la estimación del reservorio de carbono en el arbolado en los sitios de trabajo de la Red Mex-SMIC.

Carbono en hierbas, arbustos y renuevos

Las parcelas de 1 m² se encuentran anidadas dentro de las parcelas de 400 m² bajo un criterio sistemático, por lo que se puede utilizar el estimador de razón para obtener la biomasa almacenada en la parcela de 1 m² a nivel de paisaje, de manera análoga a lo

mostrado en la sección de arbolado. En el Anexo 3.20 se describen los pasos para hacer la estimación del carbono en el programa R (R Core Team 2015).

Cambio en la densidad de carbono en la biomasa aérea

Arbolado con diámetro normal mayor a 2.5 cm

Para la estimación de los cambios en los reservorios, es necesario contar con dos estimaciones de biomasa del arbolado en dos momentos distintos de medición. El diseño de muestreo en ambos momentos deben ser idénticos, las parcelas deberán ser permanentes y se deberá dar seguimiento a cada árbol en los dos momentos de medición. Además, en las estimaciones de la segunda medición, se deberán incluir las aportaciones a la biomasa de los árboles del repoblado (Anexo 3.21).

Una vez estimada integralmente la biomasa en ambos momentos de la medición, se estiman los cambios en la biomasa a nivel de cada parcela (80, 400 y 1000 m²) y se aplican los estimadores de razón para obtener los aumentos o pérdidas de biomasa por unidad de superficie. La estimación de los cambios totales de biomasa se obtiene ponderando el estimador de razón por el área correspondiente del estrato o del SMIC según corresponda al objetivo de reporte.

Hierbas, arbustos y renuevos

La biomasa cosechada en el segundo momento de medición corresponde al cambio absoluto en el reservorio de carbono para las hierbas, arbustos y renuevos. Esto debido a que en la primera medición se cosecha toda la biomasa menor a 2.5 cm de diámetro dejando completamente limpia la parcela y al año se cuantifica la incorporación de nueva biomasa-carbono en la misma parcela de 1 m².

Para estimar los cambios en los reservorios de carbono en hierbas, arbustos y renuevos, los cambios se agregan a nivel de parcela de 400 m² para calcular los estimadores de razón. El cambio total de la biomasa de hierbas y arbustos se estima

ponderando el estimador de razón de los cambios por las áreas de los estratos o del SMIC correspondiente según el nivel de análisis realizado.

Madera muerta

Árboles muertos en pie y tocones

Una vez estimado el carbono para cada árbol muerto en pie y tocón, se obtienen las densidades de carbono a nivel de paisaje, a través del uso de los estimadores de razón de manera análoga a lo mostrado en la biomasa aérea. Es decir, se obtiene multiplicando el respectivo estimador de razón por las áreas a nivel de estrato o SMIC según el nivel de análisis.

Material leñoso caído (MLC)

El dato de biomasa en el MLC, presentado en la sección previa “Estimación a nivel de observación/muestra”, es el insumo base para estimar el reservorio de carbono de MLC a nivel de paisaje. Para ello, es necesario ponderar el promedio del reservorio de carbono del MLC por el área de análisis (estrato o SMIC según corresponda). La incertidumbre del promedio de reservorio del carbono en el MLC se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{\overline{MLC}} = \frac{1.96 \times \left(\frac{Sd_{MLC_UMP}}{\sqrt{n}} \right)}{\overline{MLC}}$$

Dónde:

$U_{\overline{MLC}}$: Incertidumbre del promedio del reservorio de carbono del MLC

Sd_{MLC_UMP} : Desviación estándar del reservorio de carbono del MLC de conglomerados

n : Número de conglomerados

\overline{MLC} : Promedio del reservorio de carbono del MLC a nivel de estrato/SMIC.

Estimación de los reservorios de carbono en los componentes subterráneos: mantillo, suelo y raíces

El suelo y mantillo se recolectan en el mismo punto de muestreo y se localizan de manera sistemática dentro de las parcelas de 400 m². Por lo tanto, es posible estimar las densidades del carbono orgánico en mantillo, suelo y raíces por unidad de superficie utilizando los estimadores de razón. Tales estimaciones se agregan a nivel de parcela de 400 m² y posteriormente se calculan las densidades de carbono de manera análoga a lo presentado para la biomasa aérea. Cabe mencionar que el área de muestreo corresponderá en este caso al área de cada punto de muestreo (900 o 2500 cm²). La estimación del almacén total del carbono en mantillo, suelo y raíces resultará de la ponderación del estimador de razón por su respectiva área de análisis (estrato o SMIC).

REFERENCIAS

- Andrade, C.H.J., A. Segura, P.L.M. Forero. 2014. *Desarrollo de modelos alométricos para volumen de madera, biomasa y carbono en especies leñosas perennes: conceptos básicos, métodos y procedimientos*. Editorial Ibagué: Universidad del Tolima.
- Bardgett, D.R., L. Mommer y F.T. De Vries. 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology and Evolution* 29:292-699.
- Burton, A.J. y K.S. Pregitzer. 2008. Measuring forest floor, mineral soil, and root carbon stocks. En: C.M. Hoover (ed). *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Springer, Nueva York, pp 129-142.
- Campbell, J.J., C. Messier y J. Bauhus. 2002. Does Soil Heterogeneity and Compaction in Ingrowth-Cores Affect the Growth and Morphology of *Picea mariana* fine-roots? *Soil Science and Plant Analysis* 33:1027–1037.
- CONAFOR y PNUD. Comisión Nacional Forestal y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2014. *Protocolo de control de calidad de los datos dasométricos, en los sitios de monitoreo intensivo de carbono*. México (Inédito).
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2012. *Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Re-muestreo 2012*. CONAFOR. Zapopan, México.
- Da- Lun, T., P. Yuan-Ying, Y. Wen-De, et al. 2010. Effects of Thinning and Litter Fall Removal on Fine Root Production and Soil Organic Carbon Content in Masson Pine Plantations. *Pedosphere* 20:486–493.
- Davies, B.E. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 38:150-151.
- Dixon, R.K., A.M. Solomon, S. Brown, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.

- Hendrick, R.L. y K.S. Pregitzer. 1993. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 23:2507–2520.
- Hernández, J.L., J.M. Dupuy, D.K. Johnson, *et al.* 2014. Improving Species Diversity and Biomass Estimates of Tropical Dry Forests Using Airborne LiDAR. *Remote Sensing* 6: 4741-4763.
- Hertel, D. y C. Leuschner. 2002. A comparison of four different fine root production estimates with ecosystem carbon balance data in a *Fagus–Quercus* mixed forest. *Plant and Soil* 239:237–251.
- Hirano, Y., K. Noguchi, M. Ohashi, *et al.* 2009. A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine root production in forest ecosystems. *Plant Root* 3: 6-31.
- Hobley, E. y G. Willgoose. 2010. Measuring soil organic carbon stocks – issues and considerations. En: *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane, Australia.
- Honorio, E., N. Coronado y T.R. Baker. 2010. *Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos*. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds. Lima.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Gas Inventories Programme*. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T. y Tanabe K (eds.). IGES, Japón.
- Jackson, R.B., H.A. Mooney y E.D. Schulze. 1997. A global Budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, 7362–7366.
- Jackson, R.B., J. Canadell, J.R. Ehleringer, *et al.* 1996. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia* 108, 389–411.
- Janssens, I.A., D.A. Sampson, J. Curiel-Yuste, *et al.* 2002. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. *Forest Ecology and Management* 168:231-240.
- Madji, H. y J. Öhrvik. 2004. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden. *Global Change Biology* 10:182–188.
- Madji, H., K. Pregitzer, A.S. Morén, *et al.* 2005. Measuring fine root turnover in forest ecosystems. *Plant and Soil* 276:1-8.
- Makkonen, K. y H.S. Helmissaari. 1999. Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand—comparison of soil core and root ingrowth core methods. *Plant and Soil* 210:43-50.
- Martínez, Y.A. y J. Sarukhán. 1993. Cambios estacionales en el mantillo de un bosque tropical caducifolio y uno sub caducifolio en Chamela, Jalisco. *Acta Botánica Mexicana* 021: 1-6.
- Morfin-Ríos, J.E., E.J. Jardel, P. Alvarado y J.M. Michel-Fuentes. 2012. *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México.
- Nepstad, D.C., C.R. de Carvalho, E.A. Davidson, *et al.* 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372:666–669.
- Osawa, A. y R. Aizawa. 2012. A new approach to estimate fine root production, mortality, and decomposition using litter bag experiments and soil core techniques. *Plant and Soil* 355:167–181.
- Ostonen, I., K. Löhmus y R. Lasn. 1999. The role of soil conditions in fine root ecomorphology in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant and Soil* 208:283–292.
- Persson, H. 2002. Root system in arboreal plants. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Y. Waisel, A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). Marcel Dekker, Nueva York, pp.187–204.
- Persson, H.Å. y I. Stadenberg. 2009. Spatial distribution of fine roots in boreal forests in eastern Sweden. *Plant and Soil* 318:1–14.

- Picard, N., L. Saint-André, M. Henry. 2012. *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurements to prediction*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier.
- Polomski, J. y N. Kuhn. 2002. Root Research Methods. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Y. Waisel, A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). Marcel Dekker, Nueva York, pp 447-488.
- Pregitzer, K. S. 2002. Fine Roots of Trees: A New Perspective. *New Phytologist* 54:267-270.
- Roy, S. y J.S. Singh. 1995. Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat. *Soil Biology and Biochemistry* 27:33-40.
- Santantonio, D. y R.K. Hermann. 1985. Standing crop, production, and turnover of fine roots on dry, moderate, and wet sites of mature Douglas-fir in western Oregon. *Annals of Forest Science* 42:113-142.
- Silva, J.N., M. Lopes y J do C.A. 1984. *Inventário florestal continuo em florestas tropicais: a metodologia utilizada pela EMBRAPA-CPATU na Amazonia brasileira*. Belém, EMBRAPA. Documentos.
- Smucker, A.J.M, J.C. Ferguson, W.P. DeBruyn, et al. 1987. Image analysis of video-recorded plant root systems. En: *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. Taylor, H.M. (Ed.). ASA, CSSA, SSSA Inc., Madison, pp 67-80.
- Trumbore, S.E. y J.B. Gaudinski. 2003. The secret lives of roots. *Science* 302: 1344-1345.
- Ugalde, A.L.A. 1981. *Conceptos básicos de dasimetría*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de recursos naturales renovables. Turrialba, Costa Rica.
- UNAM, U de G y Universidad de Washintong. Universidad Autónoma de México, Universidad de Guadalajara. 2011. *Características físicas de los combustibles forestales del material leñoso caído y hojarasca de México y métodos para la estimación de las variables requeridas para combustibles en el manual del INFyS*. México (inédito).
- Vadeboncoeur, M.A, S.P. Hamburg, J.D. Blum, et al. 2012. The quantitative soil pit method for measuring belowground carbon and nitrogen stocks. *Soil Science Society of America Journal* 76: 2241-2255.
- Van Wagner, C.E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14: 20-26.
- Van Wagner, C.E. 1982. *Practical aspects of the line intersect method*. Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ont. Information Report PI-X-12.
- Velasco, E., H. Ramírez, F. Moreno y A. de la Rosa. 2003. Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Rev. Ciencia Forestal en México* 94: 23-43.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, H. Asbjornsen y R.A. Dahlgren. 1995. Roots, nutrients and their relationship to spatial patterns. *Plant and Soil* 168-169:113-123.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt, P.A. Palmiotto, et al. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187:159-219.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt y J. Bloomfield. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200: 71-89.
- Vogt, K.A. y H. Persson. 1991. Measuring growth and development of roots. En: *Techniques and approaches in forest tree ecophysiology*. J.L. Lassoie y T.M. Hinckley (eds.). CRC, Boca Raton, pp. 470-501.
- Waddell, K.L. 2002. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators* 1: 139-153.

- Walker, S.M., T.R.H. Pearson, N. Harris, *et al.* 2009. *Procedimientos Operativos Estándar para la Medición de Carbono Terrestre*. Winrock International.
- Walkley, A. y I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.
- Warren, G.W. y F. Olsen. 1964. A line intersect for assessing logging waste. *Forest Science* 10: 267-276.
- Xiao, C.W., Y.J. Cueriel, I.A. Janssens, *et al.* 2003. Above- and belowground biomass and net primary production in a 73-year-old Scots pine forest. *Tree Physiology* 23:505-516.

CAPÍTULO IV. FLUJOS DEL CARBONO FORESTAL EN PARCELAS PERMANENTES

Vanessa Maldonado, David López Merlín, Gregorio Ángeles Pérez, Juan Manuel Dupuy Rada, José Luis Andrade, Fernando Arellano Martín, Griselda Chávez Aguilar, Oswaldo Carrillo, Craig Wayson

INTRODUCCIÓN

En las estimaciones de las emisiones y remociones de GEI en los sistemas forestales, los flujos que se dan dentro de los ecosistemas (p. ej. producción de hojarasca y descomposición de la materia orgánica), entre el ecosistema y la atmósfera (p. ej. respiración de las plantas y microorganismos) normalmente no se consideran. Esto se debe a que son procesos que requieren de mediciones constantes y su variabilidad es alta. Estos procesos proveen información útil sobre los detalles de la dinámica del carbono en el corto plazo, y pueden también generar información que sirve como insumo a modelos ecosistémicos para y disminuir la incertidumbre asociada a las estimaciones de emisiones/remociones de gases de efecto invernadero (GEI).

PRODUCCIÓN DE HOJARASCA

La producción de hojarasca es la sumatoria del detrito vegetal (hojas, flores, frutos, ramas, entre otros) que se aporta al suelo durante un periodo de tiempo, expresado en unidades de $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ o $g\ m^{-2}\ año^{-1}$ (del Valle-Arango 2003, Newbould 1967, Proctor 1983, Vitousek 1984). Este proceso constituye una de las principales vías mediante el cual el carbono atmosférico, asimilado por medio de la fotosíntesis, pasa al suelo (Pardé 1980, Sala *et al.* 1988).

La caída de hojarasca actúa como un sistema de entrada de carbono y nutrientes al suelo, y se considera una fuente básica para el suelo y la biota asociada a éste (Isaac y Nair 2006, Vitousek y Sanford 1986). Se estima que alrededor de 80% del total de los bioelementos que ingresan al suelo en los bosques tropicales, se deriva de la hojarasca (León-Rico 2003). Además, las tasas de caída y de descomposición de la hojarasca regulan el flujo de energía y de nutrientes, así como la productividad primaria, y la formación y el mantenimiento de la fertilidad del suelo en los ecosistemas terrestres (Olson 1963). Por lo tanto, la cuantificación de la producción de hojarasca es importante para comprender la cantidad de carbono que pasa de la biomasa aérea a los componentes subterráneos que se incorporan al carbono orgánico del suelo (Couteaux *et al.* 1995, Facelli y Pickett 2008, Martín *et al.* 1996).

Diseño de muestreo

Para estimar la producción de hojarasca, se colecta en cestas o trampas distribuidas en el sotobosque, la biomasa que cae durante al menos un año (Salas e Infante 2006). El número, la distribución espacial, la forma, la superficie de las trampas, y la frecuencia de muestreo son factores importantes que inciden en la precisión y la representatividad de la estimación de la producción de hojarasca (Renolfi *et al.* 1986). A su vez, estas dependen de la variabilidad de la vegetación en el sitio. El procedimiento general se resume en la Figura 4.1.

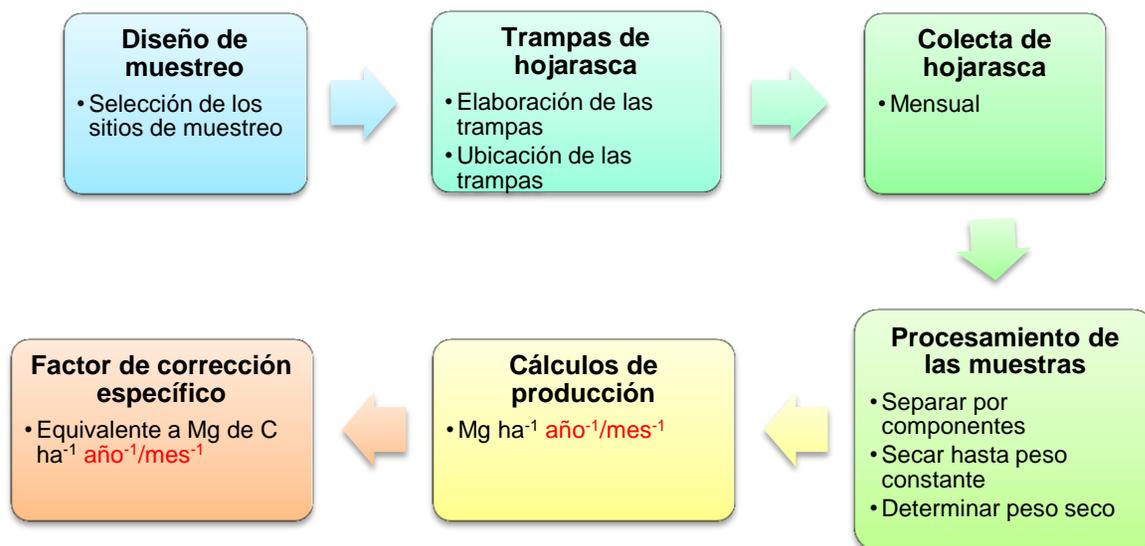


Figura 4.1. Diagrama de flujo para calcular la producción de hojarasca y el contenido de carbono.

Se recomienda emplear de una a cuatro trampas por parcela, en todos los conglomerados o en la mitad de ellos (Figura 4.2). Si las condiciones del sitio son heterogéneas, se recomienda colocar 4 trampas por parcela y muestrear el mayor número posible de conglomerados.

Al momento del diseño resulta crítico tomar en cuenta la cantidad de material que se coleccionará, ya que se deben asignar recursos económicos para el personal que procesará las muestras. Asimismo, se debe contar con el espacio para el almacenamiento y secado de las mismas.

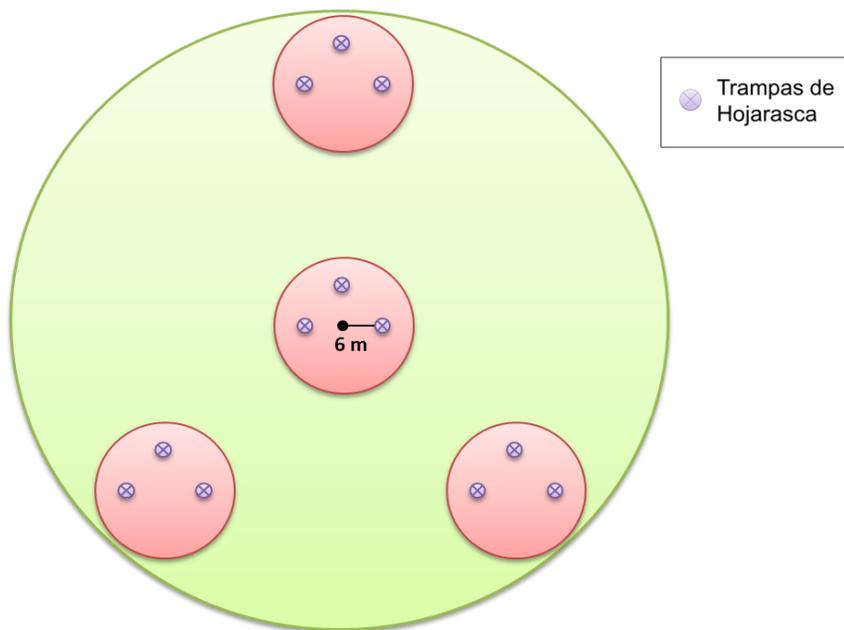


Figura 4.2. Ejemplo de la distribución de las trampas de hojarasca en las parcelas (en color rojo), al interior del conglomerado (en verde).

Trampas de hojarasca

En general se utilizan trampas circulares de 0.5 a 1 m², pero también se llegan a utilizar de forma rectangular. El material para su construcción varía dependiendo del recurso económico y la mano de obra disponibles. El área definida para las trampas debe ser la misma en todas, para facilitar y estandarizar los cálculos.

Se recomienda usar trampas circulares elaboradas con poliducto y tela de malla fina, para evitar la pérdida de material; de preferencia utilizar tela sintética ya que la de algodón puede favorecer el crecimiento de hongos. También es importante que la tela se acomode de manera que no acumule humedad de la lluvia para evitar la descomposición del material que cae en la trampa. Se pueden colocar patas de varilla o estacas de metal, que se puedan enterrar bien en el suelo; las trampas pueden estar a 0.8 o 1 m de altura, para que el material no quede en contacto con el suelo (Figura 4.3).



Figura 4.3. Ejemplo de trampas de hojarasca circulares.

Colecta de muestras y procesamiento en laboratorio

De acuerdo al objetivo del trabajo, la frecuencia de las colectas pueden ser cada 15, 30, o más días, si las condiciones ambientales son secas y no se tiene el recurso para tener datos con mayor frecuencia. Una colecta mensual es lo más recomendable para evitar la pérdida del material por descomposición. Si el sitio es muy húmedo, se recomienda aumentar la frecuencia del muestreo.

Lo ideal para este componente, es tener datos a lo largo de un año, pero si se requiere conocer la variabilidad interanual la colecta puede continuarse por varios años. En cada colecta, se coloca en bolsas de plástico o de papel (según las condiciones de humedad del material) la totalidad del material depositado por trampa, y se identifican sus características en una etiqueta (sitio, número de trampa y fecha). Posteriormente se traslada al laboratorio para su procesamiento (Figura 4.1). Si se quiere conocer el aporte de cada componente (i.e. hojas, ramillas, flores, frutos, otros residuos) a la hojarasca, estos se separan y se registra el peso seco de cada uno (Figura 4.4).

Cálculo de la producción de la hojarasca

Con los datos del peso seco del material obtenido en cada bolsa y colecta, se determina la tasa de producción mensual de hojarasca, por muestra o por componente, mediante la siguiente ecuación (modificada de Honorio y Baker 2010):

$$P = \frac{\text{Peso seco total/componente de cada trampa (g)}}{\text{Área de la trampa (5026.56 cm}^2\text{)} \times \text{Intervalo de tiempo de colecta (días)}} \times \frac{10^8 \text{ cm}^2}{1 \text{ ha}}$$

$$\times \frac{30 \text{ días}/365}{1 \text{ mes}/1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ Mn}}{10^6 \text{ g}}$$

Los datos que se obtienen se multiplican por la concentración de carbono para obtener el carbono en cada colecta, por componente. Para estimar la producción de carbono a nivel de paisaje se usa un enfoque de estimadores de razón similar al del cálculo de los almacenes de carbono (ver el Capítulo III de este documento).



Figura 4.4. Procesamiento de las muestras de hojarasca. a) Etiquetado de las bolsas, b) separación por componentes, c) secado a 60 °C, y d) pesado en balanza analítica.

PRODUCCIÓN DE RAÍCES

Las raíces son un componente importante de la productividad primaria neta (~33%) (Jackson *et al.* 1997, Vogt *et al.* 1998, Da-Lun *et al.* 2010) y del flujo de carbono del suelo. Controlan el flujo de nutrientes hacia el suelo y juegan un rol ecológico importante dentro de los ecosistemas, proveyendo agua y nutrientes a las plantas para su exitoso establecimiento. Por ello, es de gran importancia conocer y entender la dinámica de las raíces, su función y los patrones espaciales y temporales de su crecimiento, dentro de los ecosistemas terrestres.

Por ser un componente que implica un gran esfuerzo en su muestreo, generalmente no se tienen muchos datos sobre la dinámica de las raíces. Sin embargo, existen distintas metodologías para dar seguimiento a esta dinámica, una de ellas son los minirizotrones, una técnica no destructiva.

Éstas metodologías, pese a que aún no han sido homologadas plenamente, están diseñadas para abordar y tratar de entender cuestiones básicas como, cuánta biomasa de raíces por unidad de área se produce a través del tiempo, los factores que controlan dicha producción y los efectos sobre los procesos a nivel de ecosistema. A continuación se presentan algunas metodologías enfocadas a la medición de las raíces.

Extracción secuencial de núcleos de suelo

Es una de las metodologías más comunes, la cual consiste en la extracción de muestras de suelo de forma secuencial en núcleos cilíndricos o bloques de suelo inalterados (Vogt y Persson 1991, Polomski y Kuhn 2002). Es ideal para usarse en grandes escalas. Permite determinar la biomasa de raíces finas y medianas, calcular la producción primaria neta, la biomasa y producción de micorrizas, para estimar la distribución espacial (biomasa, necromasa, longitud de las raíces) y la relación volumétrica de raíces finas, medianas o gruesas (Polomski y Kuhn 2002, Vogt *et al.* 1998).

Sin embargo, una de sus limitaciones es que para evaluar el recambio de las raíces, se requiere de supuestos sobre el crecimiento de la raíz y su mortalidad, que pueden ser difíciles de determinar (Madji *et al.* 2005). Otra consideración está relacionada con la perturbación que puede ocasionar al momento de meter el núcleo en el suelo.

Núcleos de crecimiento interno

Con estos núcleos se mide la cantidad de biomasa en raíces finas, su crecimiento y producción (Campbell *et al.* 2002, Vogt *et al.* 2002), pero también se ha utilizado para probar la eficiencia de sustratos orgánicos y cuantificar la respuesta del ecosistema a la adición de nutrientes (Smith *et al.* 2005).

La metodología consiste en colocar núcleos de suelo libres de raíces, hechos de malla, que permiten estimar la producción de raíces por unidad de área y tiempo. Su principal desventaja radica en que provocan un disturbio continuo en cada muestreo y no proporcionan información precisa sobre cuándo ocurre la mortalidad de las raíces (Campbell *et al.* 2002, Lukac y Godbold 2001, Madji *et al.* 2005, Steingrobe *et al.* 2001). En cambio, entre sus principales ventajas destacan que son altamente sencillos, de muy bajos costos, y proveen medidas en unidades que son directamente comparables con la mayoría de los reservorios y flujos de carbono (volumen/ área de suelo; Madji *et al.* 2005, Metcalfe 2006).

Minirizotrones

Es una metodología visual en donde un tubo transparente es insertado en el suelo, el cual cuenta con un sistema de procesamiento de vídeo (mini cámaras) para almacenar y analizar las imágenes grabadas (Polomski y Kuhn 2002). Estas cámaras capturan imágenes fotográficas del crecimiento de las raíces finas a diferentes profundidades y el mismo segmento de suelo puede ser medido directa y repetidamente (Polomski y Kuhn 2002, Vogt *et al.* 1998). En contraste a la metodología de rizotrones, esta metodología evita el muestreo espacial insuficiente por la colocación de múltiples tubos de observación en el terreno.

Los minirizotrones se utilizan para obtener información sobre características cuantitativas como longitud, densidad, dinámica, propagación de raíces laterales y clasificación de clases diamétricas de las raíces (McMichael y Taylor 1987, Vogt *et al.* 1998). Además de información cualitativa como color, porcentaje de suberización, ramificación de raíces, patrones de senescencia, parasitismo y simbiosis (Hendrick y Pregitzer 1993, Majdi *et al.* 1992).

Anteriormente, esta metodología presentaba un problema para el procesamiento de las imágenes de los tubos, debido a que no existían algoritmos desarrollados para analizar los datos colectados por la cámara; actualmente existen varias opciones de software que analizan eficientemente los datos (Vogt *et al.* 1998), tales como el RHIZOGEN y ROOT (Hendrick y Pregitzer 1992, Smucker *et al.* 1987).

Debe considerarse que al instalar los minirizotrones se pueden alterar los patrones de crecimiento de las raíces, por los cambios que se ocasionan al colocar el tubo (Vogt *et al.* 1998). Otras consideraciones son, que la compactación, la temperatura y la humedad pueden también modificarse, lo cual puede modificar la densidad y el patrón de crecimiento de las raíces.

Las principales ventajas es que se pueden realizar observaciones secuenciales de las raíces y además se observan raíces finas menores de un milímetro de diámetro (Madji *et al.* 2005); no acarrea los errores por pérdidas de raíces, que generalmente están asociados a la extracción de núcleos de suelo. Por otro lado, las tasas de mortalidad de las raíces presentan alta precisión, dado al seguimiento que se le da a la raíz hasta desaparecer de la superficie del tubo (Vogt *et al.* 1998, Hendricks *et al.* 2006).

Para el uso de los minirizotrones, se recomienda considerar los mismos sitios en los cuales se tomaron las muestras para estimar la biomasa de las raíces, así como combinar dichas mediciones con las mediciones de los flujos de CO₂ del suelo y los de las torres de covarianza de torbellinos. Para definir la frecuencia del muestreo es también necesario conocer un poco de la fenología de las raíces, si no se cuenta con

dicha información se puede hacer una evaluación preliminar, mientras se estabilizan las condiciones alrededor de los tubos minirizotrones.

DESCOMPOSICIÓN DE MATERIAL FOLIAR Y DE RAMAS

Se denomina descomposición a un conjunto de procesos que provocan cambios físicos y químicos en la materia orgánica y transforman sus constituyentes básicos en formas inorgánicas, las cuales pueden ser asimiladas por las plantas (Chapin III *et al.* 2002, Swift *et al.* 1979, Waring y Schlesinger 1985). Estos procesos mantienen la transferencia de materia y energía dentro de los ecosistemas (Aber y Melillo 1991); se estima que la mayor parte de la producción primaria neta terrestre regresa al suelo en forma de materia orgánica muerta, y se incorpora a éste por medio de la descomposición (Coleman *et al.* 2004).

La descomposición del mantillo juega un papel importante en el ciclo del carbono, porque de ésta depende la transferencia del carbono entre la vegetación y el suelo (Aber y Melillo 1991, Field *et al.* 1998). Para predecir de manera más precisa la cantidad de carbono que se libera a través de la descomposición, es necesario contar con datos locales que apoyen a entender dicho proceso, y así representar las distintas condiciones que influyen en la transferencia del carbono vía la descomposición.

Procesos y factores involucrados en la descomposición de la materia orgánica muerta

La descomposición de la materia orgánica involucra tres procesos: 1) la *lixiviación*, que se refiere al transporte de compuestos solubles a través del perfil del suelo por acción del agua; 2) la *fragmentación del material* en partículas más pequeñas que aumenta el área superficial y redistribuye el material fragmentado, proceso meramente físico realizado por factores abióticos (acción del viento, agua y hielo) y bióticos (actividad de la macrobiota del suelo); y 3) el *catabolismo* que involucra procesos bioquímicos de

transformación de compuestos orgánicos complejos en moléculas, realizados por la microbiota (bacterias y hongos) e incluyen a la mineralización (liberación de nutrientes minerales) y la humificación (síntesis de humus) (Cousteaux *et al.* 1995, Heal *et al.* 1997, Lavelle y Spain 2001, Mason 1976, Swift *et al.* 1979).

La lixiviación, la fragmentación y el catabolismo se llevan a cabo de manera simultánea en la materia orgánica en descomposición (Swift *et al.* 1979; Chapin III *et al.* 2002). Estos procesos son influenciados de forma diferencial por factores como el clima (régimen de temperatura y humedad), los organismos del suelo, la composición química del tejido vegetal en descomposición y las propiedades del suelo (González y Seastedt 2001, Lavelle *et al.* 1993, Singh y Gupta 1977, Swift *et al.* 1979, Zhang *et al.* 2008).

Descomposición del material foliar

El método más común para evaluar la descomposición del material foliar es con las bolsas de malla (Madge 1965, Waring *et al.* 2012); este método consiste en colocar una cantidad conocida de material foliar en una bolsa de malla (p. ej. de nylon mosquitero), ponerla sobre el piso forestal y registrar la pérdida de peso a través del tiempo.

Los ensayos de descomposición de hojas pueden hacerse por especie o grupo de especies, según los objetivos del experimento y de la disponibilidad de recursos humanos y económicos. Se recomienda elegir las especies que sean representativas a nivel paisaje o unidad de muestreo.

La duración de los experimentos depende de las condiciones del sitio y del material vegetal, al igual que la frecuencia de la toma de muestras, las cuales pueden realizarse cada 15 días, si la descomposición es relativamente alta. En los ecosistemas templados los procesos de descomposición son más lentos, por lo que las colectas pueden hacerse con menor frecuencia y por más de un año.

Si se quiere representar la tasa de descomposición a nivel paisaje, es recomendable instalar el ensayo de descomposición en todas las unidades de muestreo del área de

estudio. Al interior de cada unidad de muestreo se deben instalar al menos 3 lotes. Cada lote debe contener el número de bolsas necesario para la duración del ensayo. Se debe considerar bolsas extras para cada lote para cubrir las bolsas que se puedan dañar. Los lotes deben distribuirse de manera sistemática al interior de la unidad de muestreo.

Para elegir el tipo de material foliar, es necesario definir si el proceso de descomposición se caracterizará a nivel de especie o de ecosistema (mezcla de especies). En el caso en que se utilice mezcla de especies se puede usar el índice de valor de importancia relativa (IVI, Mostacedo y Fredericksen 2000) para elegir las especies.

También hay distintas formas de coleccionar el material, una de ellas es cortando las hojas senescentes de los individuos vivos; este material se caracteriza por tener un color de amarillo a marrón. Otra forma consiste en coleccionar las hojas que caen en trampas de hojarasca o las recién caídas en el piso forestal. Hay que tomar las previsiones para obtener la cantidad de material necesario; si el sistema es caducifolio, se pueden aprovechar los meses de mayor caída de hojas. Si no se tiene material disponible, se pueden sacudir algunos individuos para obtenerlo.

Una vez que se coleccionan las hojas, se llenan las bolsas de malla con 20 g del material. Se pueden usar grapas inoxidable o nylon para cocer las bolsas y colocar las etiquetas. En la medida de lo posible, mapear la ubicación de las distintas especies al interior de cada lote de descomposición. Es importante colocar las muestras de manera aleatoria. Se recomienda realizar colectas mensuales por al menos un año en el caso de las selvas tropicales y dos años para los bosques templados. En el Cuadro 4.2 se detalla el procedimiento propuesto para los ensayos de descomposición de hojas.

Cuadro 4.2. Procedimiento para los ensayos de descomposición de hojas.

- Colectar las hojas de los árboles vivos, de las trampas de hojarasca o las recién caídas al piso forestal.
- Poner a secar las hojas al aire y a la sombra, hasta que pierdan el exceso de humedad (aproximadamente durante tres días). Remover el material para facilitar el secado.
- Una vez secas, pesar aproximadamente 20g de hojas y colocarlas en las bolsas de malla mosquitero de 20 x 20 cm (previamente elaboradas); registrar el peso exacto del material de cada bolsa.
- Etiquetar cada bolsa para identificar su contenido (p. ej. Especies, procedencia); esto puede ser con latas de aluminio para repujado.
- Del total de las bolsas preparadas, tomar una sub-muestra para considerarla como “tiempo cero” (10% de la muestra); estas se secan a 70 °C hasta peso constante y se obtiene el peso original, así como la concentración de carbono y en su caso, los nutrientes.
- Llevar el resto de las bolsas a campo y colocarlas sobre el piso forestal de manera aleatoria dentro del área designada para el experimento. Se recomienda marcar los límites del área en donde se colocan las bolsas (p. ej. estacas de metal pintadas con aerosol) para su fácil ubicación en futuras colectas
- En cada colecta, limpiar las bolsa para eliminar el material que no pertenece a la muestra (p. ej. hojas que recién cayeron sobre la bolsa, y raíces o tallos que crecen a través de la malla). Se pueden usar brochas para la limpieza. Si las bolsas tienen suelo mineral, enjuagar con agua destilada para eliminar el suelo, cuidando no perder el material original.
- Una vez limpias las muestras, colocarlas en bolsas de papel, etiquetarlas y secarlas en el horno a 70 °C hasta peso constante. Registrar el peso seco de cada bolsa.
- Moler el material de cada bolsa y hacer la determinación de la concentración de carbono.
- Calcular la constante de descomposición (k), según el modelo de ajuste de los datos.

Estimación de la tasa de descomposición de la fracción foliar

Con los pesos registrados en el laboratorio se obtiene la pérdida de masa relativo al peso inicial y se estima la tasa anual de descomposición (*k*) mediante el modelo propuesto por Jenny *et al.* (1949) y modificado por Olson (1963); un modelo de descomposición exponencial negativo simple cuya fórmula es:

$$k = -[\ln\left(\frac{X_t}{X_0}\right)]/t$$

Dónde:

k = tasa de descomposición

X_t = peso seco del material foliar en un tiempo dado.

X_0 = peso seco del material foliar al inicio del experimento.

t = tiempo transcurrido (días)

Descomposición de ramas

Para el caso de los ensayos de descomposición de ramas, lo ideal es contar con material que provenga de ramas recién caídas en el piso forestal o en trampas.. Otra opción consiste en cortar ramas de los árboles vivos que pertenecen a las especies con mayor índice de valor importancia relativa del área de trabajo. En la medida de lo posible, también se puede considerar la densidad de la madera para caracterizar especies con alta, media y baja densidad. Es recomendable emplear en los ensayos de descomposición de las ramas, la misma clasificación de diámetros del inventario de material leñoso caído.

Si se quiere representar la tasa de descomposición a nivel paisaje, es recomendable tener información sobre las especies vegetales así como a las diferencias en la densidad de la madera. Al interior de cada unidad de muestreo se deben instalar al menos 3 lotes (lote es un grupo de ramas que contiene las distintas condiciones o especies de ramas consideradas en un ensayo). Cada lote debe contener el número de ramas necesario para la duración del ensayo. Se deben considerar ramas extras para cada lote para cubrir las que se dañen o extravíen; esto puede ser 5% del total de ramas. Los lotes deben distribuirse de manera sistemática al interior de la unidad de muestreo (conglomerado). Para tener datos con bajo nivel de incertidumbre es recomendable montar ensayos de 3 años de duración (Craig Wayson comunicación personal 2014). La frecuencia de colecta de muestras depende del diámetro de ramas, por ejemplo para ramas finas (0.5 – 2,5 cm de diámetro) se colecta cada dos meses, para ramas medianas (diámetro de 2.5 a 7.4 cm) cada tres meses y para ramas gruesas (diámetro mayor a 7.5 cm) cada seis meses. En el cuadro 4.2, se muestra el procedimiento para el ensayo de descomposición de ramas.

Cuadro 4.3 Procedimiento para los ensayos de descomposición de ramas.

- Colectar ramas recién caídas o de las que se conozca el tiempo que cayeron al piso forestal (p.ej. después de un huracán). Una alternativa es cosecharlas de árboles vivos.
- Cortar los extremos de cada rama colectada, secarlas a 70 °C hasta peso constante para inferir el peso seco de las muestras antes de la descomposición (tiempo cero).
- Ajustar las dimensiones del material que se llevará a campo (parte central de las ramas colectadas), considerando el mantener una proporción de 1:10 entre el diámetro y la longitud (Hoover 2008), así como el permitir su fácil traslado a campo.
- Secar al aire y a la sombra las ramas para el experimento de descomposición, hasta que pierda el exceso de humedad (aproximadamente durante tres días). Se recomienda remover las ramas para facilitar el secado.
- Anotar el peso y volumen en seco, así como la gravedad específica (peso seco/volumen seco) de cada rodaja. Etiquetarlas con placa de aluminio indicando la unidad de muestreo, lote y descripción de la rama (especie, densidad).
- Establecer al azar los lotes con ramas secas y etiquetadas dentro del conglomerado.
- Los intervalos de colecta, dependerán del diámetro de la rama.
- En cada colecta, limpiar cuidadosamente las ramas de cualquier material ajeno (p. ej. hojas, suelo mineral). Se pueden usar brochas o agua destilada, cuidando no perder partes de la rama.
- Colocar las muestras limpias en bolsas de papel, con su etiqueta correspondiente y secarlas en el horno a 70 °C hasta peso constante.
- Registrar el peso y volumen en seco de cada rama, así como su gravedad específica. Moler una sub-muestra de las ramas para su envío al laboratorio y determinación de la concentración de carbono.

Estimación de la tasa de descomposición de ramas

Con la información de laboratorio, se estima la pérdida de masa mediante el modelo de Kyung *et al.* 2011:

$$k = -[\ln\left(\frac{x_t}{x_0}\right)]/t$$

Donde,

k: es la tasa de descomposición o de pérdida de masa en un tiempo t medido en la escala de un año

X_t : es el peso seco de la rama después de un tiempo (g),

X_o : es el peso seco inicial de la rama (g)

t: tiempo medido en la escala de un año

MEDICIÓN DEL FLUJO DE CARBONO DEL SUELO

La estimación del balance neto de los flujos del carbono resulta de calcular y comparar las entradas y salidas de dicho elemento en los ecosistemas. Una de las principales salidas del carbono es la difusión del dióxido de carbono (CO_2) del suelo hacia la atmósfera, y deriva de la respiración de las raíces y de los organismos como bacterias, hongos y diversos grupos de animales que habitan el suelo; este fenómeno es conocido como flujo del carbono del suelo, respiración del suelo o evolución de CO_2 del suelo (Raich y Schlesinger 1992, Luo y Zhou 2006).

Dentro de los ecosistemas, el flujo del carbono del suelo varía en el espacio y tiempo. Por ejemplo, su variación espacial está asociada a diferencias en el tamaño de los árboles, la temperatura y humedad del suelo, biomasa de bacterias y raíces, tipo de suelo, cantidad de mantillo y condición topográfica (Adachi *et al.* 2006, Epron *et al.* 2006, Kosugi *et al.* 2007, Katayama *et al.* 2009, Bréchet *et al.* 2011, Takahashi *et al.* 2011, Bae *et al.* 2013, Ryan y Law 2005, Song *et al.* 2013). En cambio, la variación temporal está influenciada por diferencias en la temperatura y humedad del suelo, la precipitación y la actividad fotosintética de las plantas (Raich y Schlesinger 1992, Raich *et al.* 2002, Parkin y Kaspar 2003, Adachi *et al.* 2009, Ruehr *et al.* 2010, Kume *et al.* 2013, Ming *et al.* 2014). Debido a que la variación espacial en el flujo del carbono del suelo es importante tanto en distancias menores a un metro como de varios metros (Davidson *et al.* 2002), y a que la variación temporal puede ocurrir tanto entre horas de un mismo día como entre semanas, estaciones o años, es importante que al estimar el flujo del carbono del suelo de un ecosistema a escala del paisaje se consideren los factores espacio-temporales que los influyen.

Métodos de medición del flujo de carbono del suelo

Existen tres métodos para medir el flujo del carbono del suelo, el del gradiente, cámaras de sistema abierto y cámaras de sistema cerrado, cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas (Cuadro 4.3). Se considera que las cámaras de sistema cerrado son el modo más recomendable de medir el flujo del carbono del suelo, por abarcar diferentes escalas espacio-temporales.

El método de cámara de sistema cerrado requiere insertar un anillo de cloruro de polivinilo (PVC) para delimitar el área del suelo en dónde se medirá el flujo, y en lo posible, evitar la perturbación del mismo en cada medición. La inserción del anillo de PVC puede romper raíces o hifas de hongos del suelo modificando las condiciones del suelo en el punto de medición, por lo que se recomienda insertar los anillos de PVC al menos una semana antes de iniciar las mediciones de flujo de carbono del suelo (LI-COR 2012). El modelo 8100A de LI-COR, incluye seis anillos de PVC cuya anchura y longitud dependen del diámetro de la cámara a utilizar (10 o 20 cm). Para la cámara de 20 cm pueden fabricar anillos adicionales al cortar un tubo de PVC de uso hidráulico que tenga un espesor de 8 mm y un diámetro interno de 20 cm.

El sistema consta de una cámara que se conecta a una unidad de control que contiene un analizador de gases (Figura 4.3). Las mediciones con este sistema se realizan sobre anillos de PVC que se insertan sobre el suelo. Cuando se fabrican anillos de PVC, su longitud debe elegirse con base en la profundidad del suelo en el sitio de estudio, pues hay que tomar en cuenta que: el anillo debe estar insertado a una profundidad suficiente para que se mantenga inmóvil al realizar o terminar las mediciones y no haya entradas laterales de aire al punto de medición (LI-COR 2012). Es recomendable insertar los anillos durante la temporada del año en que el suelo está húmedo, pues se requerirá menos esfuerzo para introducir el anillo. La inserción del anillo puede realizarse al colocarlo sobre el suelo y golpearlo con un mazo de goma si los suelos no están compactados (Bradford y Ryan 2008), o bien se puede colocar sobre el ecuador del anillo una tabla o pedazo de madera a la que se golpeará con un martillo. También se puede colocar el anillo sobre el suelo e ir formando una zanja alrededor de su

perímetro con una barreta o algún otro objeto afilado. Esta última forma permite la mejor inserción del anillo aunque puede romper varias raíces en el proceso.

Cuadro 4.4. Ventajas y desventajas de los métodos de medición del flujo de carbono del suelo (Bradford y Ryan 2008).

Método	Ventajas	Desventajas
<p>Del gradiente. Se mide la concentración de CO₂ a distintas profundidades en el perfil del suelo, y se estima el flujo por diferencia de concentración y tasa de difusión del CO₂.</p>	<p>Proporciona mediciones a escalas temporales cortas (horas, días, semanas) y largas (meses, años). Permite conocer el flujo a lo largo del perfil e identificar puntos con mayor producción de CO₂.</p>	<p>Los puntos de medición son poco representativos a nivel espacial, es costoso porque requiere de un gran número de mediciones. La tasa de difusión de CO₂ no es igual en todos los puntos, por lo que debe medirse en cada uno.</p>
<p>Cámaras de sistema abierto. Se mide la concentración de CO₂ del suelo y el aire que sale de la cámara abierta al ambiente; cuando la concentración de CO₂ en la entrada y salida son iguales, se mide la tasa de flujo del aire al interior de la cámara.</p>	<p>Al estar en contacto con el ambiente refleja de manera más adecuada la dinámica del flujo del carbono del suelo, lo cual es ideal para mediciones continuas en el tiempo.</p>	<p>Son equipos grandes y cada medición requiere de varios minutos, esto dificulta el traslado entre puntos de medición, y se complica tener una representación espacial adecuada.</p>
<p>Cámaras de sistema cerrado. Se mide el cambio en la concentración de CO₂ al interior de la cámara cerrada y se calcula el flujo de carbono del suelo; de este modo se aísla el suelo de la atmósfera.</p>	<p>Las mediciones se realizan de manera rápida, lo cual permite abarcar varios puntos de medición. Pueden realizarse mediciones continuas sobre un mismo punto para evaluar variaciones en el flujo a distintas escalas temporales, para ello hay cámaras automatizadas.</p>	<p>Durante la medición el aire al interior de la cámara está aislado de la atmósfera, esto puede provocar diferencias en la concentración de CO₂ o en la presión del aire. Al colocar el anillo se puede perturbar el suelo y dar mediciones que no son las reales.</p>

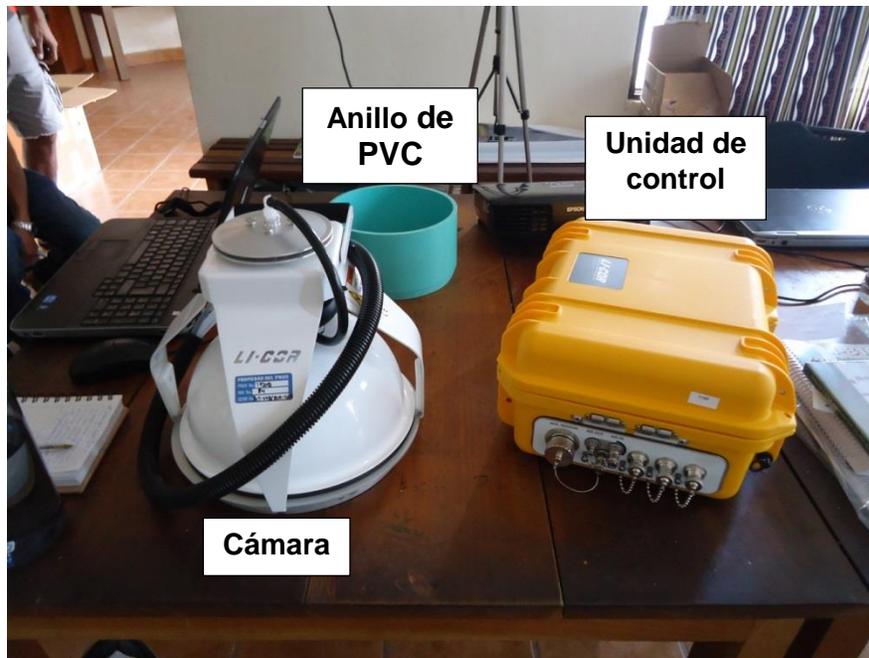


Figura 4.3. Sistema de medición de flujo de carbono del suelo LI-8100A.

REFERENCIAS

- Aber, J. D. y J. M. Melillo. 1991. *Terrestrial ecosystems*. Saunders College Publishing. Orlando
- Adachi, M., Y.S. Bekku, W. Rashidah, *et al.* 2006. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology* 34: 258-265.
- Adachi, M., A. Ishida, S. Bunyavejchewin, *et al.* 2009. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology* 25: 531-539.
- Bae, K., D.K. Lee, T.J. Fahey, *et al.* 2013. Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems. *Agroforestry systems* 87: 131-139.
- Bradford, J. B. y M.G. Ryan. 2008. Quantifying soil respiration at landscape scales. En: *Field measurements for forest carbon monitoring. A landscape-scale approach*. Hoover C.M. (Ed.). Springer, Nueva York. pp. 143-162.
- Bréchet, L., S.Ponton, T. Alméras, *et al.* 2011. Does spatial distribution of tree size account for spatial variation in soil respiration in a tropical forest? *Plant and soil* 347: 293-303.
- Campbell, J.J., C. Messier y J. Bausch. 2002. Does Soil Heterogeneity and Compaction in Ingridith.Cores Affect Growth and Morphology of black spruce fine roots?. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:1027–1037.
- Chapin III, F.S., P.A. Matson y H. A. Mooney. 2002. *Principles of terrestrial ecosystems ecology*. Springer Verlag. Nueva York.
- Clark, D.A., S. Brown, D.W. Kicklighter, *et al.* 2001. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications* 11: 356–370.
- Couteaux, M.M., P. Bottner y B. Berg. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 63–66.

- Da- Lun, T., P. Yuan-Ying, Y. Wen-De, *et al.* 2010. Effects of Thinning and Litter Fall Removal on Fine Root Production and Soil Organic Carbon Content in Masson Pine Plantations. *Pedosphere* 20:486–493.
- Davidson, E., K. Savage, L. Verchot y R. Navarro. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 21-37.
- Del Valle-Arango, J.I. 2003. Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico Colombiano. *Interciencia* 28: 148-153.
- Epron, D., A. Bosc, D. Bonal y V. Freycon. 2006. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. *Journal of Tropical Ecology*, 22: 565-574.
- Facelli, J.M. y S.T.A. Pickett. 2008. Plant litter: its dynamics and effects on plant community. *Botanical Review* 57: 1–32.
- Field, C.B., M.J. Behrenfeld, J.T. Randerson y P. Falkowski. 1998. Primary production of the Biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281: 237-240.
- González, G. y T.R. Seastedt. 2001. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forest. *Ecology* 82: 955-964.
- Heal, O.W., J.M. Anderson y M.J. Swift. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. En: *Driven by nature. Plant litter quality and decomposition*. Cadisz, G. y K.E. Giller (eds.). Cambridge University Press. Cambridge.
- Hendrick, R.L., y K.S. Pregitzer. 1992. Spatial variation in tree root distribution and growth associated with minirhizotrons. *Plant and Soil* 143: 283–288.
- Honorio, E.N. y T.R. Baker. 2010. *Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos*. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Universidad de Leeds. Lima.
- Hoover, C.M. (Ed.). 2008. *Field measurements for forest carbon monitoring: a landscape-scale approach*. Springer-NY, USA.
- Isaac, S.R. y M.A. Nair. 2006. Litter dynamics of six multipurpose trees in a homegarden in Southern Kerala, India. *Journal of Agroforestry System* 67: 203-213.
- Jenny, H., S.P. Gessel y F.T. Bingham. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* 68: 419-432.
- Jackson, R.B., H.A. Mooney y E.D. Schulze. 1997. *A global Budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 94, 7362–7366.
- Katayama, A., T. Kume, H. Komatsu, *et al.* 2009. Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1666-1673.
- Kosugi, Y., T. Mitani, M. Itoh, *et al.* 2007. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 147: 35-47.
- Kume, T., N. Tanaka, N. Yoshifuji, *et al.* 2013. Soil respiration in response to year-to-year variations in rainfall in a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Ecohydrology* 6: 134-141.
- Kyung, Y.T., H. Chung, H.R. Kim, *et al.* 2011. Coarse woody debris mass dynamics in temperate natural forest of Mt. Jumbong, Korea. *Journal of ecology and field biology* 34:115-125, 2011.
- Lavelle, P., E. Blanchart, A. Martin, S. Martin, *et al.* 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25: 130-150.
- Lavelle, P. y A.V. Spain. 2001. *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers.
- León-Rico, R. 2003. Efectos de la descomposición, la frugivoría y la remoción de frutos y semillas de especies arbóreas sobre los patrones de descomposición in situ en el suelo de la selva húmeda. En: *Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México*. Álvarez-

- Sánchez, J. y E. Naranjo-García (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Facultad de Ciencias. Instituto de Ecología, A.C. México. pp 89-107.
- LICOR. 2012. *LI-8100A automated soil CO₂ flux system and LI-8150 multiplexer instruction manual*. Nebraska, USA.
- Luo, Y. y X. Zhou. 2006. *Soil respiration and the environment*. Elsevier. Burlington, USA.
- Lukac, M. y D.L. Godbold. 2001. A modification of the in-growth method to determine root production in fast growing tree species. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164:613–614.
- Madge, D. 1965. Litterfall and litter disappearance in a tropical forest. *Pedobiologia* 5: 273-278.
- Majdi, H., A.J. Smucker y H. Persson. 1992. A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* 147:127–134.
- Martin, A., J.F. Gallardo e I. Santa-Regina. 1996. Aboveground litter production and bioelement potential return in an evergreen oak (*Quercus rotundifolia*) woodland near Salamanca (Spain). *Annales des Sciences Forestieres* 53: 811–818.
- Mason, C.F. 1976. *Decomposition*. The Camelot Press Ltd. Southampton.
- Metcalfe, D. 2006. *Cálculo de dinámicas de raíz en ecosistemas tropicales*. Manual de campo. University of Edinburgh, School of Geosciences, Drummond Street. EH8 9XP Edinburgh, Scotland, U.K.
- Ming, W., L. Xingtu, Z. Jitao, et al. 2014. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration at temperate *Leymus Chinensis* meadow steppes in western Songnen Plain, China. *Chinese Geographical Science* 24: 287-296.
- Mostacedo, B. y T.S. Fredericksen. 2000. *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia.
- Newbould, P. 1967. *Methods for estimating the primary production of forest*. IBP. Hanbook N° 2. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Olson, J.S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 322-33.
- Pardé, J. 1980. Forest Biomass. Forests products abstracts. *Commonwealth Forestry Bureau* 41:343-361.
- Parkin, T.B. y T.C. Kaspar. 2003. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1763-1772.
- Polomski, J. y N. Kuhn. 2002. Root Research Methods. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Y. Waisel, A. Eshel y U. Kafkafi (eds.). Marcel Dekker, Nueva York. pp 447-488.
- Proctor, J. 1983. Tropical forest litter-fall. I. Problems of data comparison. En: *Tropical Rain Forest Ecology and Management*. S.L. Sutton, T.C. Whitmore y Chadwick C.A. (eds.). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Raich, J. y W.H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B* 44: 81-99.
- Raich, J.W., C.S. Potter y D. Bhagawati. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. *Global Change Biology* 8: 800-812.
- Renolfi, R., F. Dallatea, H. Pérez y C. Kunst. 1986. *Métodos de estimación de biomasa aérea (hojas) de especies leñosas arbóreas y arbustivas*. INTA, FAO, UNESCO, MAB. Santiago del Estero, Argentina.
- Ruehr, N.K., A. Knohl, y N. Buchmann. 2010. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland. *Biogeochemistry* 98: 153-170.
- Ryan, M.G. y B.E. Law. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* 73: 3-27.
- Sala, E., L. Parton, A. Joyce y K. Lauenroth. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States: spatial pattern and major controls. *Ecology* 69: 40-45.

- Salas, J.S. y A. Infante. 2006. Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana* 40: 47-70.
- Singh, J.S. y S.R. Gupta. 1997. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review* 43:449-528.
- Smith, C.K., M.R. Coyea, y A.D. Munson. 2005. Response of Fine Roots to Fertilized Ingrowth Cores in Burned and Harvested Black Spruce Ecosystems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36:1361-1372.
- Smucker, A.J.M, J.C. Ferguson, W.P. DeBruyn, *et al.* 1987. Image analysis of video-recorded plant root systems. En: *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. Taylor, H.M (Ed.). ASA Spec. Publ. no. 50. ASA, CSSA, SSSA, Inc., Madison, WI. pp 67–80.
- Song, Q.H., Z.H. Tan, Y.P. Zhang, *et al.* 2013. Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 6: 65-72.
- Steingrobe, B., S. Harald y C. Norbert. 2001. The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops—influence of soil and root disturbance during installation of the bags on root ingrowth into the cores. *European Journal of Agronomy* 2:143-151.
- Swift, M.J., O.W. Heal y J.M. Anderson. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press, Berkeley, California.
- Takahashi, M., K. Hirai, P. Limtong, *et al.* 2011. Topographic variation in heterotrophic and autotrophic soil respiration in a tropical seasonal forest in Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition* 57: 452-465.
- Vitousek, P. 1984. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forest. *Ecology* 65: 285-298.
- Vitousek, P.M. y R.L. Sanford. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review Ecology and Systematics* 17: 137–167.
- Vogt, K.A., D.J. Vogt y J. Bloomfield. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200:71-89.
- Vogt, K.A. y H. Persson. 1991. Measuring growth and development of roots. En: *Techniques and approaches in forest tree ecophysiology*. Lassoie, J.L. y T.M. Hinckley (eds.). CRC, Boca Raton, Florida, pp 470–501.
- Waring, R.H. y W.H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press. Orlando.
- Zhang, D., D. Hui, Y. Luo y G. Zhou. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology* 1: 85-93.

CAPÍTULO V. ESTIMACIONES DE ALMACENES Y FLUJOS DEL CARBONO CON OTROS ENFOQUES.

René Garruña, María Eugenia González, José Luis Andrade, Gregorio Ángeles, Roberth Us Santamarina, Luis Simá Gómez, José Luis Hernández Stefanoni, Marcela Olguín, Craig Wayson

TORRES DE COVARIANZA DE TORBELLINOS

La covarianza de torbellinos (“eddy covariance”; Burba y Anderson 2010) es una técnica de medición atmosférica que permite cuantificar en tiempo real el intercambio de gases (p. ej. bióxido de carbono, vapor de agua, metano) y energía entre los ecosistemas y la atmósfera. Para su utilización, se requiere de la instalación de una serie de sensores montados sobre una estructura (usualmente una torre). En el mundo, esta técnica se ha empleado en diferentes ecosistemas, en su mayoría bosques, aunque también en áreas agrícolas, pastizales, lagos, océanos, zonas urbanas o suburbanas (Baldocchi 2003, Crawford *et al.* 2011, Reimer *et al.* 2013).

La mayoría de las torres de covarianza de torbellinos han sido instaladas con fines científicos, pues con una buena calidad en los datos obtenidos con esta técnica se pueden recrear escenas del pasado, conocer lo que sucede en el presente y estimar con alto grado de certeza futuros eventos de intercambio de gases del lugar de medición, siempre utilizando como referencia los parámetros meteorológicos.

El diseño y la complejidad del sistema a utilizar depende de varios factores, los más relevantes son:

- Las preguntas que se quieren responder sobre el sitio en estudio
- El presupuesto para la adquisición de equipos y su mantenimiento

- El número de personas que participan en el proyecto
- La capacidad del personal en sus respectivas funciones

Actualmente, los efectos del cambio climático de origen antropogénico son cada vez más evidentes, por tal razón se ha vuelto necesaria la medición continua de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Los sitios que cuentan con una torre de covarianza de torbellino pueden medir los gases mencionados y así poder inferir sobre lo que sucede en sitios con características similares. Si bien es cierto que a nivel global una torre sólo es un punto de observación, cuando los datos generados en cada uno de estos puntos se unen a nivel regional y continental, las observaciones en conjunto de todos los sitios pueden integrarse en una red densa de datos contundentes. Existen diferentes tipos de redes donde se agrupan los sitios que utilizan la técnica de covarianza de torbellinos: a nivel global FLUXNET, a nivel continental ASIAFLUX, AMERIFLUX, EUROFLUX y OZFLUX, a nivel de país, España (CARBORED-ES) y Canadá (FLUXNET-CANADA), entre algunos otros (Baldocchi *et al.* 2001).

En México existe una red de torres llamada MexFlux, dedicada a medir los flujos tanto de gases de efecto invernadero como de energía en ecosistemas terrestres, urbanos, marinos y costeros; actualmente cuenta con 11 sitios establecidos y su objetivo principal es generar conocimiento científico sobre el rol que juega la dinámica de los ecosistemas mexicanos en el cambio ambiental global (Vargas *et al.* 2013).

La información derivada a través de las torres de covarianza de torbellinos es esencial para detectar la tendencia de las condiciones ambientales y climáticas, relacionarlas con procesos ecológicos y como insumo para modelos (Hollinger 2008). Por lo tanto, aunque el equipamiento de una torre puede ser costoso, es muy deseable como componente de un sitio de medición intensiva de carbono. Los datos que genere la torre permiten realizar comparaciones entre mediciones realizadas en parcelas permanentes de muestreo y a través de sensores remotos. Cuando se combinan las tres

metodologías, se pueden realizar extrapolaciones de las estimaciones de almacenes y flujos de carbono a nivel regional e incluso nacional.

Equipo básico

La torre de covarianza de torbellinos puede ser tan básica o tan compleja como uno la requiera, siempre dependiendo del presupuesto con el que se cuente. La cantidad de variables que se desean medir, así como la cantidad de sensores destinados para una misma variable juegan un rol importante en la inversión inicial. Por ello, es sumamente importante que se defina el tipo de datos que se desea obtener antes de comprar la instrumentación. Cualquier torre debe de contar con un equipamiento básico, fundamentado en cinco componentes principales: estructura, información meteorológica y del suelo, información de flujos, registro de los datos y alimentación eléctrica.

Estructura

El tamaño y el tipo de la estructura de la torre son de gran importancia, debe ser adecuado al sitio en el que se desea medir. La altura a la que se localicen los sensores por encima del dosel debe asegurar por un lado, que las observaciones se hagan dentro de la capa frontera de la superficie de la vegetación, y por otro, que los flujos incluyan los torbellinos (*eddies*) más pequeños y más cercanos a la superficie. Un sistema de covarianza de torbellinos localizado a mayor altura tendrá una huella con una porción mayor del paisaje en la dirección prevalente del viento, por lo que al decidir la altura de los instrumentos es necesario también considerar la heterogeneidad de la superficie que medirá el sistema. Adicionalmente, para evitar que los sensores sean cubiertos por los árboles, hay que considerar si el tamaño actual del dosel es definitivo o incrementará en el futuro.

Para definir la estructura de la torre se debe considerar la necesidad de capacitación tanto en el uso del equipo, como de la seguridad del personal que estará a cargo de la torre. Para escalar la estructura se debe usar un arnés (recomendable en torres con sección triangular) o a través de algún tipo de escalera alrededor de la torre (recomendable en torres autosoportadas de sección cuadrangular). En ecosistemas de

baja estatura un trípode puede ser suficiente. Un elemento indispensable en cualquiera de las estructuras que se utilice es el pararrayos, cuyo uso puede evitar que los instrumentos se averíen por descargas eléctricas. Los costos de la estructura son muy variables, estos dependerán del tipo y del tamaño de la estructura, así como del acceso al sitio para su instalación.

Medición de flujos

Para estimar los flujos turbulentos se utilizan un anemómetro ultrasónico y un analizador de gases en el infrarrojo (IRGA; por sus siglas en inglés; Cuadro 5.1). El anemómetro es la pieza clave de la instrumentación en las torres, proporciona la dirección y la velocidad del viento. El IRGA puede ser de dos tipos: de sistema abierto (p. ej. LI-7500) o de sistema cerrado (p. ej. LI-7200), ambos proporcionan datos con alta calidad y la decisión por alguno de ellos recae en las condiciones ambientales, pero sobre todo en la alimentación eléctrica con la que se cuente. Esto es porque el sistema cerrado requiere más energía para su funcionamiento. El analizador de CH₄ es recomendado para humedales, y sólo se encuentra en sistema abierto (LI-7700). Algunos sitios cuentan con analizadores tanto para CO₂ como para CH₄. En el anexo 5.1, se menciona la marca más utilizada de analizadores de gases y anemómetro sónico.

Meteorología

Para obtener los datos meteorológicos se necesitan: sensor de temperatura y humedad relativa, pluviómetro, cuantómetro, piranómetro y radiómetro neto. En el anexo 5.1, se presentan los instrumentos con las marcas más comunes utilizados.

Información del suelo

Para tener información del suelo son necesarios: sondas de temperatura, de contenido volumétrico de agua y placas de flujo de calor. Se recomienda que estos sensores se dividan en dos juegos y se ponga cada uno en extremos opuestos alrededor de la torre. En sitios donde se mide el flujo de carbono del suelo se recomienda que

incrementen la cantidad de estos sensores. En el anexo 5.1, se menciona la marca más utilizada de estos instrumentos.

Registro de los datos

Para la adquisición y almacenamiento de todos los datos obtenidos se requiere un registrador de datos (*datalogger*). A pesar de que algunas compañías como LI-COR venden un paquete básico que incluye un registrador acoplado a los instrumentos del sistema para facilitar todo el proceso, la mayoría de las torres utilizan un registrador más potente, con capacidad para albergar conexiones de otro tipo de sensores complementarios al registro de flujos, como sensores de flujo de savia, entre otros. Para definir cuál sistema de adquisición de datos será el adecuado hay que tomar en cuenta la dimensión del proyecto y conocer las limitaciones de cada sistema.

Los registradores Campbell Scientific son los más comunes en las torres de covarianza de torbellinos, por la cantidad de canales (conexión/alimentación) y por la afinidad de su lenguaje de programación (CRBasic) con diversos tipos de sensores genéricos. En el anexo 5.4, se menciona la marca más utilizada de los instrumentos necesarios para la adquisición y almacenamiento de los datos.

Alimentación de energía del sistema

Es necesario tener una fuente de energía eléctrica para poder hacer funcionar los instrumentos de la torre. En sitios alejados se requiere la instalación de paneles solares, baterías, reguladores y demás implementos necesarios para poder alimentar de electricidad el sistema.

Una tarea fundamental es el cálculo de los requerimientos del sistema. Se debe tener en cuenta la demanda de energía de cada instrumento, y con base en ello realizar el cálculo del número y capacidad de paneles solares y baterías necesarias para alimentar al sistema. En el cuadro 5.1 se presenta el consumo de energía, equipado con un medidor de gases en infrarrojo de tipo sistema cerrado (LI-7200, LICOR, Nebraska,

Estados Unidos), bajo las condiciones ambientales de una selva mediana subcaducifolia (Kaxil-Kiuic, Yucatán, México).

Cuadro 5.1. Requerimiento energético de la instrumentación básica de una torre de covarianza de torbellinos, equipada con un sistema cerrado de analizador de gases en el infrarrojo.

Instrumento	Requerimiento (W h⁻¹)
Analizador de gases CO ₂ /H ₂ O (LI-7200) y unidad de interfaz (LI-7550)	≈ 45
Registrador de datos (CR3000)	≈18
Piranómetro (LI-200X)	N/A
Sensor de quantum (LI-190sb)	N/A
Sensor de humedad relativa y temperatura (HMP155a)	0.036
Sensor de temperatura del suelo (TCAV)	N/A
Sensores (2) de contenido de agua en el suelo (CS616)	1.56
Radiómetro neto (NR_lite2)	N/A
Pluviómetro (TE525E)	N/A
Platos (2) para flujo de calor del suelo (HFP01sc)	2.6
Sensor de temperatura y humedad relativa del aire (HMP155A)	6
Anemómetro sónico	0.66
Total	≈73.779 W h⁻¹
N/A = no aplica, en este caso el requerimiento energético es mínimo	

Conocer el consumo total energético del sistema de medición da la pauta para realizar el cálculo diario (diurno/nocturno). Estos datos permitirán planear el sistema de alimentación de energía que se utilizará. En el caso de que se utilicen paneles solares para suministrar la energía requerida hay que considerar los siguientes puntos:

- El ángulo de inclinación de los paneles con respecto al movimiento del sol
- Las horas efectivas de luz
- La nubosidad del sitio (época del año)

En este sentido y a manera de ejemplo; suponiendo que en un sitio con 8 horas de luz efectiva, opera un sistema que debe funcionar las 24 horas del día, con un requerimiento de 74 W h^{-1} (Cuadro 5.1), para cubrir la demanda energética se necesitarían al menos tres paneles de 85 W hora^{-1} , dos controladores de corriente de 12 volts a 10 amperes y seis baterías solares de ciclado profundo de 12 VDC-105A @20hr. También, se sugiere dividir el sistema en dos grupos (sistema meteorológico y sistema de medición de flujos) con paneles y controladores separados.

Complementos (instrumentación opcional)

Un sistema más complejo podría contar con instrumentación complementaria como un medidor de flujos de CO_2 del suelo automatizado (IRGA 8100A; LiCOR, NE), varios IRGA a diferentes alturas en la torre, sensores de flujos de savia (tipo Granier o de flujo bidireccional) y termopares sobre los árboles ubicados alrededor de la torre, e incluso sensores específicos para estimar el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) y cámaras para registrar cambios fenológicos en la vegetación.

Instalación de la torre

Para garantizar la integridad del sistema se recomienda que la instalación de la estructura se realice por profesionales, así como la instalación del pararrayos. Antes de instalar la estructura se deben considerar las especificaciones de cada país sobre su legislación de espacio aéreo, esto con la finalidad de conocer la señalización adecuada que deberá utilizar la torre (colores, iluminación, etc.).

Antes de instalar los sensores en el sitio de medición se recomienda:

- a) Leer y entender los manuales de cada instrumento
- b) Verificar en el laboratorio que todos los instrumentos funcionen adecuadamente
- c) Realizar la programación del registrador
- d) Definir los coeficientes de calibración en el software del analizador de gases
- e) Practicar la calibración del analizador de gases

Una vez que se dominen los puntos anteriores se tendrá la certeza que cuando se realice la instalación en el sitio de medición el sistema funcionará correctamente y que los problemas por resolver serán mínimos. Durante el montaje de los instrumentos sobre la estructura, los trabajadores deberán contar con equipo de seguridad (casco, arnés, botas, etc.) en todo momento. En el caso de que el proceso de instalación se prolongue por varias horas, es recomendable realizar el trabajo por etapas. Si la estructura es considerablemente alta se requerirá al menos de cuatro personas para la instalación de los instrumentos, dos instalando (arriba) y dos asistiendo (abajo).

Manejo y mantenimiento de la torre

Es preciso que las personas que estén a cargo de la torre se capaciten para poder escalar con seguridad la estructura cada vez que sea necesario. Así como también en la descarga y procesamiento de los datos. El mantenimiento de la estructura se recomienda que sea realizado por profesionales del área, con la supervisión de los encargados de la torre. El mantenimiento se debe realizar cada vez que sea necesario, este dependerá del daño que generen las condiciones ambientales del sitio y debe incluir el ajuste de los tensores y la pintura de la estructura, así como también la revisión de las conexiones eléctricas y el pararrayos.

Descarga de datos

La descarga de los datos tanto del analizador de gases como del registrador de datos se puede realizar de tres formas:

1. Comunicación remota por medio de conexión de datos vía internet
2. Comunicación por cable (conexión Ethernet o RS232)

3. Descarga directa de la tarjeta de memoria o del dispositivo de almacenamiento USB

La descarga de datos utilizando Internet es muy cómoda y posibilita el monitoreo remoto de las condiciones del sistema. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes, suele ser costosa debido a la cantidad de datos que se generan en un sistema. Si consideramos que el equipo se programa a 10 Hz, la cantidad de datos almacenados será de 10 registros por segundo para cada variable (velocidad de viento en tres dimensiones, concentraciones de CO₂, agua y metano), lo cual ocasionará que a lo largo de los días la cantidad de datos por descargar incremente considerablemente. Otro inconveniente es que se debe de contar con señal de teléfono móvil en el sitio donde se ubica la torre.

La descarga de datos por medio de cable (conexión por Ethernet o RS232) es una opción más económica, pero que requiere acudir hasta el sitio donde se encuentra la torre. Dependiendo de la cantidad de datos acumulados, la transferencia de datos pueda tardar desde varios minutos hasta algunas horas. Descargar los datos por medio del dispositivo de memoria (tarjeta o USB) puede parecer tardado si el sistema de control de los equipos se encuentra localizado a varios metros por encima del suelo. Sin embargo, una vez que se tiene habilidad para escalar la torre, esta forma es la más rápida para la descarga de los datos, en cuestión de minutos es posible descargar meses de información.

Procesamiento de los datos

La capacidad de almacenamiento de datos de los registradores y computadoras actuales hace posible y recomendable el almacenamiento de los llamados datos crudos de alta frecuencia a partir de los cuales se realiza el cómputo de las covarianzas y los flujos. La enorme cantidad de datos generados de esta manera hace indispensable contar con equipo de cómputo eficiente, pues de ello dependerá el tiempo invertido en este tipo de acciones. Los datos obtenidos suelen dividirse en dos tipos:

- a) Datos meteorológicos: incluyen generalmente los flujos no turbulentos (radiación neta y flujo de calor hacia y desde el suelo)
- b) Datos de alta frecuencia para el cálculo de flujos turbulentos (p. ej. flujo de CO₂, calor latente y calor sensible)

El intervalo más adecuado para el cálculo de los flujos es aquel que no es demasiado largo como para incluir contribuciones de flujos no turbulentos (p. ej. patrones atmosféricos de tipo sinóptico), ni es demasiado corto como para excluir la contribución de los torbellinos (*eddies*) más lentos y por lo tanto subestimar el flujo real. La elección de un periodo de 30 minutos resulta adecuada para la mayoría de los sitios, y es el estándar en muchas redes de torres de flujo, pero idealmente el periodo idóneo debería ser determinado para cada sitio de medición. Por otra parte, los datos meteorológicos son recabados a frecuencias variables (de segundos a minutos), pero es conveniente promediarlos en periodos iguales a los de cálculo de flujos. Una vez que se cuenta con la base de datos se recomienda hacer gráficas de series de tiempo de cada una de las variables obtenidas, para verificar los patrones que han seguido los datos y verificar que la calidad de los mismos sea correcta, o en su defecto detectar algún fallo en un instrumento. Cabe mencionar que los archivos que se obtienen del registrador de datos suelen ser en formato de archivo de texto con extensión ".data" o ".dat", que pueden ser manipulados en las hojas de cálculo tradicionales (Excel).

La obtención de los flujos turbulentos requiere una serie compleja de pasos, que incluye pero no se limita a: el filtrado de los datos (picos) que se encuentran fuera del rango para cada variable, la aplicación de coeficientes de calibración a los datos del analizador de gases, la rotación de ejes coordinados para corregir errores de inclinación del anemómetro, la maximización de las covarianzas entre la velocidad vertical del viento y los escalares atmosféricos, la aplicación de correcciones espectrales, la implementación del procedimiento de Webb, Pearman y Leuning para corregir un aparente flujo de masa por cambios en la densidad del aire (Webb *et al.* 1980), y finalmente el cálculo de los flujos utilizando las ecuaciones adecuadas. En el caso de algunos modelos de anemómetros, es necesario además aplicar correcciones durante

los periodos en que el ángulo de ataque del viento excede ciertos límites, así como corregir la influencia de las fluctuaciones de humedad y momentum en el anemómetro. El procesamiento de los datos concluye con el control de calidad de los flujos resultantes y el rellenado de las series de flujos (“gap filling”) para estimar los intercambios a escala estacional o anual y la verificación de los resultados finales.

Para realizar todas estas tareas con miles de datos, había que dedicar mucho tiempo y volverse experto en el manejo de algunos paquetes de cálculo numérico y matrices MATLAB o utilizar algún programa específico con ciertas limitaciones de manipulación de datos como EdiRe, EddySoft, entre otros. Actualmente la mayoría de las personas que realizan este tipo de tareas utilizan el programa de libre acceso EddyPro, el cual es distribuido por LI-COR en afán por facilitar los cálculos de los flujos a los usuarios de sus equipos. La ventaja de usar EddyPro se basa entre otras cosas por:

- Facilidad para integrar los datos de alta frecuencia para el cálculo de flujos con los archivos de variables meteorológicas y de suelo.
- Flexibilidad para cargar y correr formatos de archivos con extensión “.data”, “.csv” y “.txt”, además del formato nativo de los equipos Li-COR (“.ghg”).
- Ordenes programadas en el modo exprés para que cualquiera sin experiencia en el área pueda obtener datos.
- Opción de modo avanzado donde se pueden escoger el método de rotación de ejes que se quiere emplear, los criterios de filtración de picos electrónicos, el método de calibración, las correcciones espectrales, de ángulo de ataque y el procedimiento WPL que es necesario implementar, el análisis estadístico y el formato en que se desean los archivos de salida de resultados, ya sea tipo Ameriflux, Euroflux, etc.
- Codificación de errores que permite identificar cual es el fallo existente en caso de que lo haya.
- Estimación del área fuente de los flujos (Footprint).

A pesar de que se pueden correr sólo los datos correspondientes al analizador de gases y al anemómetro para poder estimar los flujos, es altamente recomendable proveer al programa EddyPro los archivos de datos meteorológicos (denominados por EddyPro como "biomet data") los cuales son los datos tanto meteorológicos como de suelo que consideremos que pueden servir ya sea para hacer el balance de energía del sitio o para ayudar en la verificación del patrón obtenido en los flujos. Por otra parte, en la programación del analizador de gases y el anemómetro hay que definir si el empaquetamiento de los datos será en formato con extensión ".data" o ".ghg", éste último es un tipo de archivo comprimido especial para ser analizado con EddyPro, pero si los datos van a ser analizados con otro tipo de programa como MATLAB es recomendable que el empaquetamiento sea como archivo de texto (.data).

Conclusiones y recomendaciones a futuro

Las torres de covarianza de torbellinos han demostrado ser un método ampliamente confiable, con aplicaciones en diversos sitios (selvas, bosques, océano, desiertos, zonas agrícolas, urbanas y suburbanas). En las últimas décadas el número de torres ha incrementado y así mismo la relevancia a nivel mundial del método de covarianza de torbellinos. En este sentido, los nuevos programas para el manejo de los datos y las mejoras en los instrumentos de medición han sido un gran aporte para disminuir errores y facilitar los cálculos generados por estos sistemas. Sin embargo, la capacitación de los operadores y los costos de mantenimiento y calibración de las torres son puntos críticos a considerar para obtener calidad en los datos.

La medición del intercambio neto de carbono, agua y energía entre la vegetación y la atmósfera complementa las mediciones biométricas y las hechas por sensores remotos. Mediante esta técnica podemos además estimar la productividad primaria neta del ecosistema y la captura del carbono "real" a través del tiempo, lo que, aunado a las mediciones meteorológicas, nos puede indicar los cambios en los flujos por cambios ambientales.

SENSORES REMOTOS

La percepción remota ofrece un medio relativamente económico para obtener una cobertura espacial completa de la distribución espacial de la biomasa aérea en grandes áreas, de una manera consistente.. Además la percepción remota permite realizar evaluaciones y actualizaciones temporales de la información muestreada y analizada.

Uno de los métodos más comunes para estimar la distribución de la biomasa aérea consiste en obtener los valores promedio de esta variable para diferentes coberturas del suelo (Hernández-Stefanoni y Ponce-Hernández 2006). En este método, las clases de cobertura del suelo o tipos de vegetación son vistas como hábitats y la biomasa dentro de esas clases es estimada a través de muestras de campo, esto es, se utiliza implícitamente el valor medio de la clase como interpolador espacial. Sin embargo entre los retos de dicho método están la simplificación de tener un único valor promedio para estimar todos los puntos no medidos dentro de cada clase, y el suponer independencia de las muestras, es decir que no se toma en cuenta la dependencia espacial o la autocorrelación (Dormann *et al.* 2007).

Existen diferentes métodos de interpolación espacial que utilizan datos auxiliares intensivos como imágenes de satélite y la autocorrelación, los cuales pueden aumentar la precisión de las predicciones de la variable de interés. Entre esos procedimientos se encuentra el de Regresión con kriging, el cual combina un modelo de regresión lineal simple o múltiple con el kriging ordinario de los residuales de regresión, para finalmente estimar la distribución espacial continua de la variable de interés (Webster y Oliver 2001). El método kriging incorpora un modelo matemático para describir la variación espacial de los datos a través de una medida de la autocorrelación espacial entre pares de muestras, las cuales describen la varianza en una distancia dada. La representación gráfica de todas estas varianzas, en función de la distancia que separa a las muestras, es el semivariograma (conocido también como variograma), y el cálculo de la varianza entre pares de muestras separadas por intervalos de distancia se conoce como

semivarianza. El Kriging utiliza el grado de autocorrelación espacial entre sitios de muestreo para obtener estimaciones en sitios no medidos (Webster y Oliver 2001).

En este apartado se presenta la metodología para estimar la distribución espacial de la biomasa utilizando ambos procedimientos, clasificación y regresión con kriging. Esto nos permitirá hacer sugerencias generales sobre los métodos de mapeo más adecuados y el uso de datos de la percepción remota como fuentes de información secundaria. Para ello se pueden utilizar imágenes de satélite como Landsat, spot, RapidEye o información de LiDAR, como información auxiliar en estos procedimientos.

Procesamiento de las imágenes ópticas

A partir de imágenes ópticas que pueden ser Landsat, Spot o RapidEye se puede obtener un mapa de cobertura del suelo, después de aplicar una clasificación supervisada de las diferentes bandas espectrales. Cada banda será geo-referenciada y corregida radiométricamente. El algoritmo de máxima verosimilitud puede ser utilizado para clasificar la imagen de satélite. Los datos de las parcelas de muestreo, que se utilizan para la obtención de la información de la biomasa aérea en campo, pueden ser utilizados además para el cálculo de la precisión total y la estadística de Cohen's Kappa, empleados para calcular la precisión final del mapa.

Procesamiento de datos LiDaR

Los datos LiDaR pueden ser procesados con el software FUSION (McGaughey 2012). Se utilizarán las coordenadas X, Y y el radio de cada parcela, para extraer la nube de puntos que corresponda con el área de las parcelas. Antes de realizar esta extracción, los datos serán normalizados a la superficie del terreno, con el objeto de expresar los retornos en términos de la altura sobre el terreno en lugar de la altura sobre el nivel del mar. Enseguida, se calculan las 62 métricas disponibles en FUSION, utilizando la nube de puntos de cada una de las unidades de las parcelas (400 y 1000 m²). Para la parcela de muestreo de 2200 m², se calculará la media y la desviación estándar de los valores de las métricas derivados de las tres parcelas 400 m² y de la parcela de 1000 m².

Las métricas obtenidas de los datos LiDaR serán utilizadas como variables predictivas en los modelos para estimar la distribución espacial de la biomasa área. Estas métricas pertenecen a dos categorías. El primer grupo está basado en estadísticas de la altura de los retornos e incluye elevación media, mínima y máxima, la variabilidad de la altura de los retornos (varianza, coeficiente de variación), estadísticas para cuantificar la localización (percentiles 1, 5, 10, ..., 100 y L-momentos), entre otras. El segundo grupo métricas de LiDaR es la cobertura de copas y se utilizará para evaluar la cobertura de la vegetación. Un umbral de 1.5 m de altura sobre el nivel del suelo se recomienda para reducir el error de la nube de puntos obtenidas en la vegetación baja y el suelo. Adicionalmente se puede utilizar una altura mínima de 4.0 m para calcular las métricas de cobertura de copas en LiDaR. Una lista completa de las métricas y la descripción detalla de cada una de ellas, así como las ecuaciones para calcularlas pueden obtenerse en (McGaughey 2012).

Interpolación usando Modelos de Clasificación

Este método usa clases como un mecanismo para interpolar los valores medios de atributos dentro de cada clase en cualquier punto o localización dentro de la misma. El modelo utilizado para representar esta interpolación es el siguiente:

$$Z_{ij} = \mu + v_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde Z_{ij} es el valor de biomasa obtenido en el punto i dentro de la clase j . El parámetro μ es la media general de la biomasa, v_{ij} es la diferencia entre la media general y la media de la clase j , finalmente, ε_{ij} es el error aleatorio. La estimación de Z_{ij} está dada por el valor medio de las observaciones dentro de la clase j .

La estimación del atributo y sus valores medios dentro de cada clase están sujetos a una serie de supuestos: 1) Los valores del atributo dentro de la clase se distribuyen de manera aleatoria e independiente, y por consiguiente no están espacialmente autocorrelacionados; 2) La varianza del atributo dentro de cada clase debe ser

homogénea; y 3) Todos los cambios en el atributo sobre el espacio ocurren en los límites de las clases y de manera abrupta (Burrough y Mcdonnell 1998).

Se utilizará el análisis de varianza para probar diferencias significativas en los valores medios de la biomasa entre clases. Adicionalmente, con el objeto de proporcionar un indicador de la bondad de la clasificación en la partición de la variabilidad de los valores del atributo, se utilizará un índice de uniformidad (Hernández-Stefanoni y Ponce-Hernández 2006). Este índice se construye como la sustracción de 1 del cociente (varianza relativa) entre la varianza dentro de las clases y la varianza total en la muestra. Este índice se calcula como sigue:

$$U = 1 - (\sigma_w^2 / \sigma_T^2)$$

Los valores de uniformidad se encuentran en el rango de 0 a 1, los cuales pueden ser fácilmente convertidos a porcentaje de uniformidad. Cuando el valor del índice es cercano a 0, la varianza dentro de la clase es de tamaño considerable y se aproxima a la varianza total. Lo cual indica que la contribución de la clase a la partición de la variabilidad total, no es útil para discriminar el atributo entre las clases consideradas. En cambio, si el valor de la uniformidad es cercano a 1, las clases son relativamente homogéneas y distinguen de manera efectiva el atributo entre ellas.

Interpolación usando Regresión con kriging

Este enfoque combina un modelo de regresión múltiple con kriging ordinario de los residuales de la regresión, es decir, este método se ocupa tanto de la dependencia espacial de las observaciones, como de la relación entre la variable dependiente (biomasa aérea) y las variables auxiliares (métricas de LiDaR; Webster y Oliver 2001). El estimador de kriging con regresión de la biomasa aérea $Z_{RK}(x)$ se define como la suma de la estimación de regresión $Z_r(x)$ obtenido como una función lineal entre la biomasa aérea y las métricas LiDAR y la estimación de kriging de los residuales espacialmente correlacionadas $E_{ok}(x)$, utilizando la siguiente ecuación:

$$Z_{rk}(x) = Z_r(x) + \varepsilon_{ok}(x)$$

Para obtener la estimación de la distribución espacial de la biomasa usando regresión con kriging, se emplea un modelo de regresión lineal múltiple entre la variable respuesta (biomasa aérea) y las variables explicativas (métricas de LiDaR) en cada una de los tres tamaños de parcelas (400, 1,000 and 2,200 m²). Las variables dependientes son formalmente probadas para normalidad y homocedasticidad, mientras que las variables de respuesta se transforman cuando es necesario con $1/x$, $\log_{10}(x)$, $\log_{10}(x + 1)$ and \sqrt{x} para cumplir con las condiciones de linealidad (Zar, 1999). Todos los análisis de regresión se ejecutan usando “stepwise forward selection”. La multicolinealidad entre variables explicativas puede causar problemas en la modelación multivariable, por lo tanto las variables explicativas utilizadas en los análisis deben ser no correlacionadas o expresar valores bajos de colinearidad (Zar 1999).

Evaluación de los diferentes modelos de interpolación

El rendimiento de los diferentes modelos de interpolación se evalúa utilizando validación cruzada dejando uno afuera. Este procedimiento, remueve iterativamente una observación del conjunto de datos, y las restantes observaciones se utilizan para ajustar el modelo. En seguida, se aplica el modelo de datos para obtener un valor predicho. La validación cruzada produce una lista de valores estimados de biomasa aérea que corresponden con los valores de las mediciones en campo para cada parcela de muestreo. Los valores predichos son adicionalmente vueltos a transformar en los valores originales y corregidos por desviaciones introducidas durante este proceso utilizando el método sugerido por Miller (1984). Los valores observados y predichos de la biomasa aérea se comparan usando el coeficiente de determinación (R^2), así como la raíz del cuadrado medio del error (RMSE).

MODELOS DE LA DINÁMICA DEL CARBONO

Una manera para mejorar la precisión y exactitud de las estimaciones sobre emisiones de gases de efecto invernadero, es mediante modelos que permitan simular la dinámica de carbono en sistemas forestales. El carbono contenido en los bosques es resultado de múltiples procesos dinámicos (el crecimiento y mortalidad de la biomasa, la producción de hojarasca, la descomposición de la materia orgánica muerta, perturbaciones naturales y antropogénicas) que varían en el tiempo y desde el nivel del árbol hasta el de paisaje. Por lo que los modelos son herramientas poderosas que permiten la integración de información sobre estos procesos y su análisis a diferentes escalas espaciales y temporales de manera consistente (Kurz *et al.* 2009, Wulder *et al.* 2010).

De los más de 150 países signatarios de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, sólo Canadá (i.e. CBM-CFS3, Kurz *et al.* 2009), Australia (i.e. FullCAM, Richards *et al.* 2005) e Indonesia (Krisnawati *et al.* 2015) usan modelos como base para la preparación de los reportes nacionales de emisiones de GEI de su sector forestal. Sin embargo, la exploración de este tipo de enfoque de estimación está empezando a extenderse a varios países, incluidos los países con los inventarios forestales nacionales, ya que los modelos pueden mejorar en gran medida la interpretación de los datos y facilitar el análisis de opciones de mitigación (IPCC 2011, Orbita *et al.* 2012, Pili *et al.* 2013). El presente apartado proporciona un panorama general sobre las principales características de los modelos que hay disponibles, y muestra algunos aspectos clave que el IPCC recomienda considerar respecto a su uso para la cuantificación y reporte de emisiones de GEI.

Tipos de modelos

En general, los modelos que se emplean para la simulación de la dinámica del carbono forestal se pueden dividir en *modelos de procesos*, aquellos que utilizan información detallada de las relaciones ecofisiológicas entre las plantas, el suelo y la atmósfera; en *modelos empíricos*, los cuales utilizan la información típicamente contenida en los

inventarios forestales, o en *modelos híbridos* porque emplean una combinación de los dos enfoques antes mencionados (Masera *et al.* 2003, Richards *et al.* 2005, Kurz *et al.* 2009).

El primer grupo de modelos simula la dinámica del carbono basado en procesos fotosintéticos, por lo que requieren de información normalmente disponible en sitios experimentales (p. ej. índice de área foliar, variabilidad climática interanual, humedad del suelo). Algunos de estos modelos incluyen a CENTURY (Ojima *et al.* 1990), 3-PG (Landsberg y Waring 1997), DNDC (Qui *et al.* 2009) y Biome-BGC (Thornton *et al.* 2005). El segundo grupo de modelos utiliza información procedente de los inventarios forestales y planes de manejo, como son las tasas de incremento del volumen comercial maderable. Por ejemplo, el CO2FIX (Masera *et al.* 2003) y el CBM-CFS3 (Kurz *et al.* 2009).

En el Cuadro 5.2 se presenta un resumen de las características principales de varios de los modelos de contabilidad del carbono forestal antes mencionados. Entre las diferencias que existen entre ellos, destaca la escala temporal y espacial de algunos de sus insumos. Por ejemplo, para la información sobre variables climáticas como la precipitación y la temperatura, los requerimientos varían desde datos diarios, mensuales hasta promedios anuales. En algunos casos, los modelos requieren información suministrada por el usuario respecto al contenido del carbono en el suelo antes de iniciar una simulación, mientras que otros calculan el tamaño de este reservorio a partir de procesos de transferencia de biomasa en simulaciones iterativas (“spin-up”). Algunos modelos se enfocan más a la cuantificación de los cambios en los reservorios del carbono forestal, mientras otros calculan los flujos de gases CO₂ y no-CO₂.

Consideraciones del IPCC

El IPCC (2006) recomienda que el empleo de modelos, por ejemplo para el reporte del balance de emisiones de gases de efecto invernadero, considere una serie de aspectos

dirigidos a transparentar los insumos y supuestos empleados en la estimación. De manera general, estos aspectos incluyen:

- 1. Selección del modelo.** Con el fin de justificar el uso de un tipo de modelo determinado, recomienda llevar a cabo una comparación entre las estimaciones preliminares obtenidas con estas herramientas y otros métodos de análisis estadístico. Es decir, mediante el uso de una misma base de datos de calibración, el IPCC sugiere evaluar si los modelos seleccionados son capaces de representar las tendencias generales del proceso de estudio o si es necesario hacer ajustes en su calibración, en su estructura o si incluso será necesario seleccionar un nuevo modelo.
- 2. Identificación de requerimientos.** Este proceso se refiere a la caracterización de los insumos espacio-temporales que requieren los diferentes componentes de los modelos, tales como información ambiental, el contenido inicial de carbono, las perturbaciones naturales y antropogénicas (e.g. incendios, plagas, manejo forestal, cambios en el uso de la tierra), entre otros.
- 3. Implementación del modelo.** Se refiere a la capacidad técnica necesaria para ejecutar las simulaciones con los modelos, considerando tanto a los recursos humanos disponibles para la preparación de los insumos al modelo, la generación y análisis de las simulaciones, así como la capacidad de recursos de cómputo. Por ejemplo, entre más fina es la resolución espacial y temporal de las simulaciones, mayor es la necesidad de capacidad de cómputo.
- 4. Evaluación de resultados y análisis de incertidumbre.** Este componente implica una evaluación rigurosa de los componentes del modelo y sus resultados respecto a información que no se utilizó en su calibración. Según el IPCC (2006), es posible que en esa comparación, las diferencias entre las estimaciones emerjan por errores en la implementación de algunos de los pasos del diseño o porque los insumos de los modelos o el modelo en sí no eran adecuados. Respecto a la incertidumbre, ésta

refleja el nivel de desconocimiento que existe acerca de los procesos que generan los flujos de gases de efecto invernadero. Este desconocimiento puede asociarse a la colecta de los datos (p ej. debido a la variabilidad natural o por datos faltantes), así como a los parámetros y estructura empleada en el modelo (Wu *et al.* 2006). En los inventarios de emisiones de GEI basados en modelos, la falta de conocimiento se asocia típicamente con la estructura del modelo y sus insumos. El IPCC recomienda la cuantificación del nivel de confiabilidad de los resultados, considerando el efecto que estos dos elementos tienen sobre la variabilidad de las estimaciones de los flujos de GEI.

- 5. Reporte y documentación.** Consiste en la documentación de cada uno de los puntos anteriores. Desde la descripción de los modelos seleccionados, los insumos requeridos, la evaluación de los resultados y la interpretación de los patrones de emisión asociados a diferentes factores (p. ej. actividades de manejo forestal). Además, este paso incluye un informe sobre el control de calidad, para documentar si existen errores en la construcción o en la programación del modelo, si los datos de entrada se colectaron o procesaron incorrectamente, si la adaptación del modelo a un dominio diferente de su origen fue inadecuada, o si los supuestos científicos que determinan la lógica del estudio no eran correctos (IPCC 2011).

Comentarios finales

Los modelos de contabilidad de carbono son herramientas potentes que permiten la cuantificación de la dinámica de GEI, las causas de los cambios observados en los reservorios del carbono, mediante la síntesis e integración de datos en diferentes escalas espaciales y temporales (Kurz 2012). A través de este tipo de herramientas, se puede: a) reproducir el fenómeno en estudio (logran una mejor representación de sistemas dinámicos no lineales a diferencia de promedios lineales utilizados en Tiers 1 y 2), b) identificar vacíos en información relevante, y c) guiar de una manera costo-efectiva la investigación sobre procesos de emisiones/remociones de GEI en el futuro (IPCC 2011). Además, son la única vía disponible para crear y comparar escenarios hacia el futuro que examinen los efectos de diferentes actividades en los sistemas

forestales, que aún no han sido observados (p. ej. manejo forestal, deforestación, perturbaciones naturales; IPCC 2011).

En México existe poca experiencia en el uso de estas herramientas como soporte de sistemas de medición y reporte del carbono forestal. Sin embargo, en colaboración entre la Red MEX-SMIC, los servicios forestales de Canadá, México y EEUU, y la Comisión de Cooperación Ambiental para América del Norte, se ha avanzado en el uso de información de los SMIC para la calibración y validación de estas herramientas y en soporte a la generación de escenarios de simulación en los estados de Acción Temprana REDD+, así como en el establecimiento de metas para la reducción de emisiones de GEI en el sector forestal (Dai *et al.* 2014, PRONAFOR 2014, CEC 2015, Mascorro *et al.* 2015, Olguín *et al.* 2015).

REFERENCIAS

- Baldocchi, D.D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479–492.
- Baldocchi, D.D., E. Falge, L.H. Gu, *et al.* 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 2415-2434.
- Birdsey, R., G. Angeles-Perez, W.A. Kurz, *et al.* 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4: 519-537.
- Burba, G. y D.J. Anderson. 2010. *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: Principles and workflow examples for scientific and industrial applications*. LI-COR Biosciences.
- Burrough, P.A. y R.A. McDonnell. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press.
- Cairns, M.A., I. Olmsted, J. Granados y J. Argaez. 2003. Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management* 186: 125–132.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguilar, *et al.* 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B* 359: 409–420.
- Chave, J., R.S. Condit, S. Lao, *et al.* 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: Results from a large census plot in Panama. *J. Ecol.* 91: 240–252.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2014. Manuales Para el Levantamiento de Datos en Campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/infys/temas/documentos-metodologicos> (accessed on 13 May 2014).

- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2013. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo. CONAFOR. Zapopan, México.
- Crawford, B., C.S.B. Grimmond y A. Christen. 2011. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment* 45: 896–905.
- Dai, Z., R.A. Birdsey, K.D. Johnson, *et al.* 2014. Modeling carbon stocks in a secondary tropical dry forest in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 225:1925.
- Dormann, C.F., J.M. McPherson, M.B. Araújo, *et al.* 2007. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography* 30: 609–628.
- Frangi, J.L. y A.E. Lugo, 1985. Ecosystem dynamics of a sub-tropical floodplain forest. *Ecol. Monogr.* 55: 351–369.
- Gebhardt, S., T. Wehrmann, M.A.M. Ruiz, *et al.* 2014. MAD-MEX: Automatic Wall-to-Wall Land Cover Monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing* 6: 3923-3943.
- Hernández-Stefanoni, J.L. y R. Ponce-Hernandez, 2006. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: Comparison of spatial interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment* 117:307-334.
- Hollinger, D. 2008. Defining a Landscape-Scale Monitoring Tier for the North American Carbon Program. En: *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Hoover, C. (Ed.). Springer-NY, USA. pp 3-16.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman y V.J. Jaramillo-Luque. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* 80: 1892–1907.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC. Hayama, Japón.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. Hayama, Japón.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2011. Use of Models and Facility-Level Data in Greenhouse Gas Inventories. Report of *IPCC Expert Meeting on Use of Models and Measurements in Greenhouse Gas Inventories* August 2010 Sydney, Australia. Eggleston, H.S., N. Srivastava, K. Tanabe, J. Baasansuren y M. Fukuda (eds). Pub. IGES. Japón.
- Krisnawati, H., R. Imanuddin, W.C. Adinugroho y S. Hutabarat. 2015. *National Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Removals on Indonesia's Forests and Peatlands*. Research, Development and Innovation Agency of the Ministry of Environment and Forestry. Bogor, Indonesia.
- Kurz, W.A. 2012. Combining inventories, remote sensing and models: CBM-CFS3 approach. En: *Sixth Regional Workshop on Forest Monitoring. Technical America Initiatives GEO FCT ND*. San José, Costa Rica.
- Kurz, W.A., CC. Dymond, T.M. White, *et al.* 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220:480-504.
- Mascorro, V.S., N.C. Coops, W.A. Kurz y M. Olguín. 2015. Choice of satellite imagery and attribution of changes to disturbance type strongly affects forest carbon balance estimates. *Carbon Balance and Management* 10:30.
- Masera, O., J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, *et al.* 2003. Modelling carbon sequestration in afforestation and forest management projects: the CO2FIX V 2.0 approach. *Ecological Modelling* 164: 177-199.
- McGaughey, R.J. 2012. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <http://www.fs.fed.us/eng/rsac/fusion> (accessed on 13 May 2014).

- Miller, D.M. 1984. Reducing transformation bias in curve fitting. *Am. Stat.*, 38: 124–126.
- Ojima, D.S., W.J. Parton, D.S. Schimel y C.E. Owensby. 1990. Simulated impacts of annual burning on prairie ecosystems. En: *Fire in North American Prairies*. Collins, S.L. y L. Wallance (Eds.). University of Oklahoma Press, Norman.
- Olguín, M., C. Wayson, W. Kurz, et al. 2015. *Adaptation of the CBM-CFS3 Modeling Framework to Mexico: Towards a Tier 3 Reporting in Strategic Landscapes for REDD+*. Mexico-Norway Project of the National Forestry Commission of Mexico. CONAFOR. México.
- PRONAFOR. Programa Nacional Forestal. 2014. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. *Programa Nacional Forestal. Reporte Especial*. CONAFOR. México.
- Qiu, J., C. Li, L. Wang, et al. 2009. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China. *Global Biogeochemical Cycles* 23: 16.
- Reimer, J.J., R. Vargas, S.V. Smith, et al. 2013. Air-sea CO₂ fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California Current. *Journal of Geophysical Research Oceans* 118, 4795–4810.
- Richards, G., D. Evans, A. Reddin y J. Leitch. 2005. *The FullCAM Carbon Accounting Model (Version 3.0). User Manual*. Australian Greenhouse Office. Canberra, Australia.
- Thornton, P.E., S.W. Running y E.R. Hunt. 2005. *Biome-BGC: Terrestrial Ecosystem Process Model, Version 4.1.1*. Model product. <http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAC/805.
- Urquiza-Haas, T., P.M. Dolman y C.A. Peres. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management* 247: 80–90.
- Vargas, R., E.A. Yépez, J.L. Andrade, et al. 2013. Progress and opportunities for monitoring water and greenhouse gases fluxes in Mexican ecosystems: The MexFlux network. *Atmosfera* 26: 325-336.
- Webb, E.K., G.I. Pearman y R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 85-100.
- Webster, R. y M.A. Oliver. 2001. *Geostatistics for Environmental Science*. John Wiley and Sons, Toronto.
- Wu, J., K. Jones, H. Li y O. Loucks. 2006. *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, The Netherlands.
- Zar, J.H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

CAPÍTULO VI. INTEGRACIÓN

Craig Wayson, Richard Birdsey

La información generada en los diferentes componentes que se incluyen en los sitios de monitoreo intensivo del carbono, tiene una utilidad intrínseca por su aporte al conocimiento sobre dinámica del carbono y por mejorar el nivel de precisión de las estimaciones. Sin embargo para relacionar este conocimiento generado desde las escalas más finas (individuo) hasta las escalas más gruesas (región) se requiere de un proceso de integración. En general, esta integración de estimaciones a diferentes escalas implica la ejecución de varios pasos para terminar con un producto viable e útil respecto a la estimación del balance del carbono forestal.

Paso 1) Representatividad

Es un análisis para determinar cuán representativos son los datos colectados en campo. Esto implica entender/estimar si logran capturar la variabilidad existente del paisaje de interés a la escala más apropiado para el dato. La representatividad es un aspecto que debe considerarse desde el diseño original de las mediciones, antes de implementar el protocolo de campo. Sin embargo, también debe examinarse una vez que ya se han colectado los datos, para asegurar que la información derivada de éstos se pueda integrar fácilmente entre las diferentes escalas. Este proceso involucra buscar información existente de otras fuentes tales como la literatura científica, encuestas formales o no formales con personas de la zona de interés y análisis estadísticos que examinen la varianza de las estimaciones añadiendo parcelas una por una, hasta que la varianza deja de incrementar y se estabiliza.

Paso 2) Determinar las causas de similitud y diferencia entre los datos/estimaciones

Escalar e integrar datos requiere de un conocimiento profundo de las causas que producen las diferencias y similitudes entre las estimaciones para, en el siguiente paso, integrarlos en una forma coherente y válida. Utilizando la información de las variables que se colecta tanto en los sitios como en escalas más grandes (ej. inventarios forestales y productos de percepción remota) se examinan las relaciones entre estas variables y se puede identificar datos similares y datos no similares. Los datos no similares pueden resultar de la falta de representatividad del

sitio (“dominio” incorrecto), de errores en la delimitación del “dominio” (e.g. inferir las estimaciones del sitio en una escala espacial inadecuada), o las diferencias pueden resultar de supuestos o procesos no conocidos, por ejemplo, las diferencias desconocidas en la historia de las perturbaciones. Este paso es donde el conocimiento de “expertos” y los análisis estadísticos se unen para entender hasta dónde la información de los sitios se puede integrar en un área más grande.

Paso 3) Métodos de integración

El proceso de integración conlleva la idea central de poder utilizar la información que se colecta a la escala más fina para fácilmente inferir procesos a escalas con mayor cobertura espacial. Unir la información local con las escalas más grandes puede hacerse usando muchos métodos diferentes de imputación (kNN, Monte-Carlo, Cadenas Markov, Bayesianos) o modelos más sofisticados (empíricos o de procesos).

Los pasos a seguir son: i) Identificar cuáles son las variables de medición que son similares en escalas más finas con las escalas más grandes (e.g. biomasa aérea); y ii) Analizar las estimaciones generadas en la escala más intensiva con métodos de imputación para generar estimaciones a escalas más grandes de la variable de interés. Si se usa un modelo, ese modelo sería parameterizado con información local y evaluado a esa escala; de ahí usar insumos que contemplan el área de interés.

Efectos de perturbaciones

Es importante recordar que lo que se mide es un dato de un punto en el tiempo y hay una variabilidad natural debida a procesos estocásticos de perturbación y perturbaciones causadas por seres humanos. Las perturbaciones pueden dejar en el paisaje efectos heredados que impactan los valores que se estima en el campo al aumentar la variabilidad en el paisaje. Además, se debe continuar con la medición en las escalas involucradas en este proceso de integración, con el propósito de mejor capturar el efecto de estas perturbaciones y robustecer el proceso de la integración.

REFERENCIAS

- Baffetta F., L. Fattorini, S. Franceschi y P. Corona. 2009. Design-based approach to k-nearest neighbours technique for coupling field and remotely sensed data in forest surveys. *Remote Sensing of Environment* 113: 463–475.
- Crookston, N.L. y A.O. Finley. 2008. yalmpute: An R package for kNN imputation. *Journal of Statistical Software* 23.
- Crookston, N.L., M. Moeur y D. Renner. 2002. *Users guide to the Most Similar Neighbor Imputation Program Version 2*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-96. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Falkowski, M.J., A.T. Hudak, N.L. Crookston, *et al.* 2010. Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: a k-nearest neighbor imputation approach incorporating LiDAR data. *Canadian Journal of Forest Research-Revue* 40:184-199.
- Golinkoff, J.S. y S.W. Running. 2013. A system to integrate multi-scaled data sources for improving terrestrial carbon balance estimates. En: *Land Use and the Carbon Cycle: Advances in Integrated Science, Management, and Policy*. D.G. Brown, D.T. Robinson, N.H.F. French y B.C. Reed (eds.). Cambridge University Press, Nueva York. pp. 259-287.
- Hudak, A.T., N.L. Crookston, J.S. Evans, *et al.* 2009. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 113:289-290.
- Lemay V.M. y A.W. Kurz. 2008. Estimating carbon stocks and stock changes in forests: linking models and data across scales. En: *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*. F. Bravo, V. Lemay, R. Jandl y K.V. Gadow (eds.). Springer, Nueva York. pp 63-81.
- Quinn, G.P. y M.J. Keough. 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York.
- Stage, A.R. y N.L. Crookston. 2007. Partitioning error components for accuracy-assessment of near-neighbor methods of imputation. *Forest Science* 53:62-72.
- Wilson, A.M., J.A. Silander, A. Gelfand, y J.H. Glenn. 2011. Scaling up: linking field data and remote sensing with a hierarchical model. *International Journal of Geographical Information Science* 25:509-521.
- Wilson B.T., C.W. Woodall y D.M. Griffith. 2013. Imputing forest carbon stock estimates from inventory plots to a nationally continuous coverage. *Carbon Balance and Management* 8:1-15.
- Wu, J. 2006. *Scaling and uncertainty analysis in ecology: methods and applications*. Springer, Dordrecht, Netherlands.

CAPÍTULO VII. PERSPECTIVAS DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN INTENSIVA DE CARBONO FORESTAL.

Craig Wayson, Richard Birdsey Marcela Olguín

En general, los sitios de monitoreo intensivo del carbono proveen información desde perspectivas ecológicas tales como procesos de ciclos de nutrientes, de perspectivas operacionales como el mejoramiento de protocolos de inventarios forestales, hasta perspectivas del monitoreo y medición de los efectos de cambio climático en el tiempo. Los sitios también proveen un espacio en el cual diversos actores (académicos, comunidades, organizaciones no-gubernamentales y gubernamentales) se unen para mantenerlos funcionando y aprovechar la información generada para una diversidad de propósitos. Este último aspecto ayuda a mejorar la toma de decisiones más allá de los sitios propiamente dichos. Por ejemplo, proveen información sobre tasas de emisión y remoción de GEI con bajos niveles de incertidumbre, lo cual robustece el sistema MRV a nivel sub-nacional cuando se emplea el conocimiento generado. Los administradores de tierras pueden utilizar la información generada para estimar los valores de carbono, la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos. También, los sitios pueden ser utilizados como "bosques experimentales" para probar las prácticas de manejo de la tierra y ver los resultados antes de la aplicación de una escala más grande.

Además, el conocimiento detallado y de largo plazo que se genera en los sitios intensivos, permite estar preparados para enfrentar desafíos futuros aún no previsibles (ej. el efecto de sequías, la incidencia de plagas y enfermedades, incendios, etc.), y proveer ejemplos que faciliten la comunicación entre los diferentes actores con respecto de estos desafíos.

Medir el carbono forestal en una forma intensiva se puede hacer en escalas locales/paisaje pero no es factible hacerlo en las escalas que se requieren para el reporte de emisiones nacionales o internacionales. Sin embargo, la información local puede emplearse para entender y mejorar la información del balance del carbono en escalas más grandes como a través del desarrollo modelos de la dinámica del carbono en los bosques (ver Capítulo VI). Existen varias maneras para mejorar esta información, y con ello generar beneficios para los países adherentes a

procesos REDD+ (ej. a través de reducciones de incertidumbre para percibir pagos por sus esfuerzos más elevados) y a la comunidad global, con números más realistas y con información de cómo se comportan algunos ecosistemas clave frente a cambio climático. De tal manera, que se avance en el nivel de entendimiento del efecto de los procesos globales en los ecosistemas naturales, con fines de reducir cambio climático y/o mitigar sus efectos negativos.

Para apoyar este último punto, es clave mantener una red de sitios intensivos con visión de *largo* plazo que permita detectar la variabilidad interanual y diferenciarla de los cambios causados por cambio climático. En este último caso se tendría que corregir y adecuar las relaciones encontradas entre las variables para mejorar las estimaciones a escalas más grandes, tales como cambios en factores de emisión en el futuro con respecto a las presentes ya que los ecosistemas no se comportarán de igual manera en el futuro clima.

Del mismo modo, es importante tener una red de sitios que representan la diversidad de paisajes que se consideran importantes para la implementación de las políticas forestales. Dado que no es posible establecer sitios de medición en todos los tipos de bosques y condiciones del paisaje, los sitios deben ser elegidos cuidadosamente y tienen una alta probabilidad de que el mantenimiento con éxito por las instituciones e investigadores competentes.

Si bien, existe mucha información sobre el comportamiento de los ecosistemas, aún hay grandes carencias, sobre todo en bosques neo-tropicales. Los sitios de monitoreo intensivo del carbono proveen información para mejorar el conocimiento de procesos naturales, lo cual ya tiene un gran valor intrínseco, que a mediano y largo plazo genera conocimiento para mejorar procesos de la toma de decisiones.

Finalmente, los sitios, implementados de la forma como se hace en México, ayudan a fortalecer lazos entre academia, gobierno, ONGs y comunidades. Esta plataforma se puede usar para probar metodologías y aplicación de políticas públicas, y evaluar los resultados antes de implementarlas a escalas más grandes. Inclusive, esta plataforma pone a México en una posición preponderante para enfrentar desafíos futuros que, hoy día, no se puede contemplar.

ANEXOS

Anexo 3.1 Procedimiento para el establecimiento de parcelas tipo INFyS en los SMIC.

1.- Se ubica el centro unidad de muestreo primaria (conglomerado), y se toma foto de las coordenadas del GPS.



Coordenada obtenida en SIG (Datum WGS84)	Coordenada marcada en campo	Comentario
16Q 254850	16Q 254849	Las cifras en negrita, marcan la diferencia de la coordenada marcada en campo y la obtenida en el SIG. Esto significa un metro de diferencia en el terreno aproximadamente
UTM 2091462	UTM 2091462	Estás coordenadas deben coincidir

Foto: Gonzalo Sánchez Santos

2.-Con cinta y brújula se marcan los cuatro puntos cardinales (norte, sur, este y oeste)



Foto: Vanessa Maldonado

4.-Con clinómetro, se obtiene la pendiente de los puntos cardinales y de las líneas a 45° entre los puntos cardinales.



Foto: Vanessa Maldonado

5.-Con el promedio de las pendientes, se obtiene la distancia compensada para delimitar Las unidades de muestreo secundarias de 80, 400 y 1000 m². Este punto es importante, ya que definirá los árboles que entran o no en cada círculo.



Foto: Gonzalo Sánchez Santos

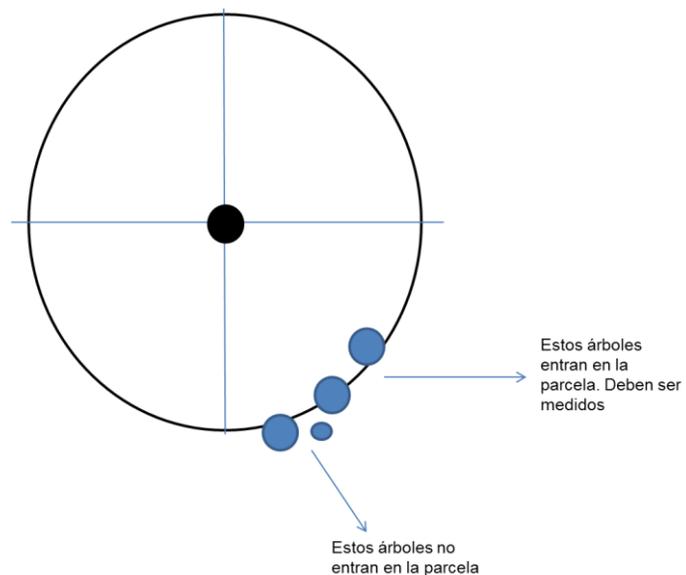


Imagen ajustada de CONAFOR 2015

6.-Desde el centro del conglomerado, se traza una línea con brújula y cinta métrica, con dirección norte 0° , a 45.14 metros, para ubicar el centro del sitio 2. Es recomendable tener dos brújulas en los extremos de la línea de trazo, para cotejar el azimut y contra-azimut, y de esta manera el centro del sitio 2 no esté desplazado. También es necesario verificar la distancia compensada por pendiente y el azimut del centro de una parcela a la otra y viceversa.



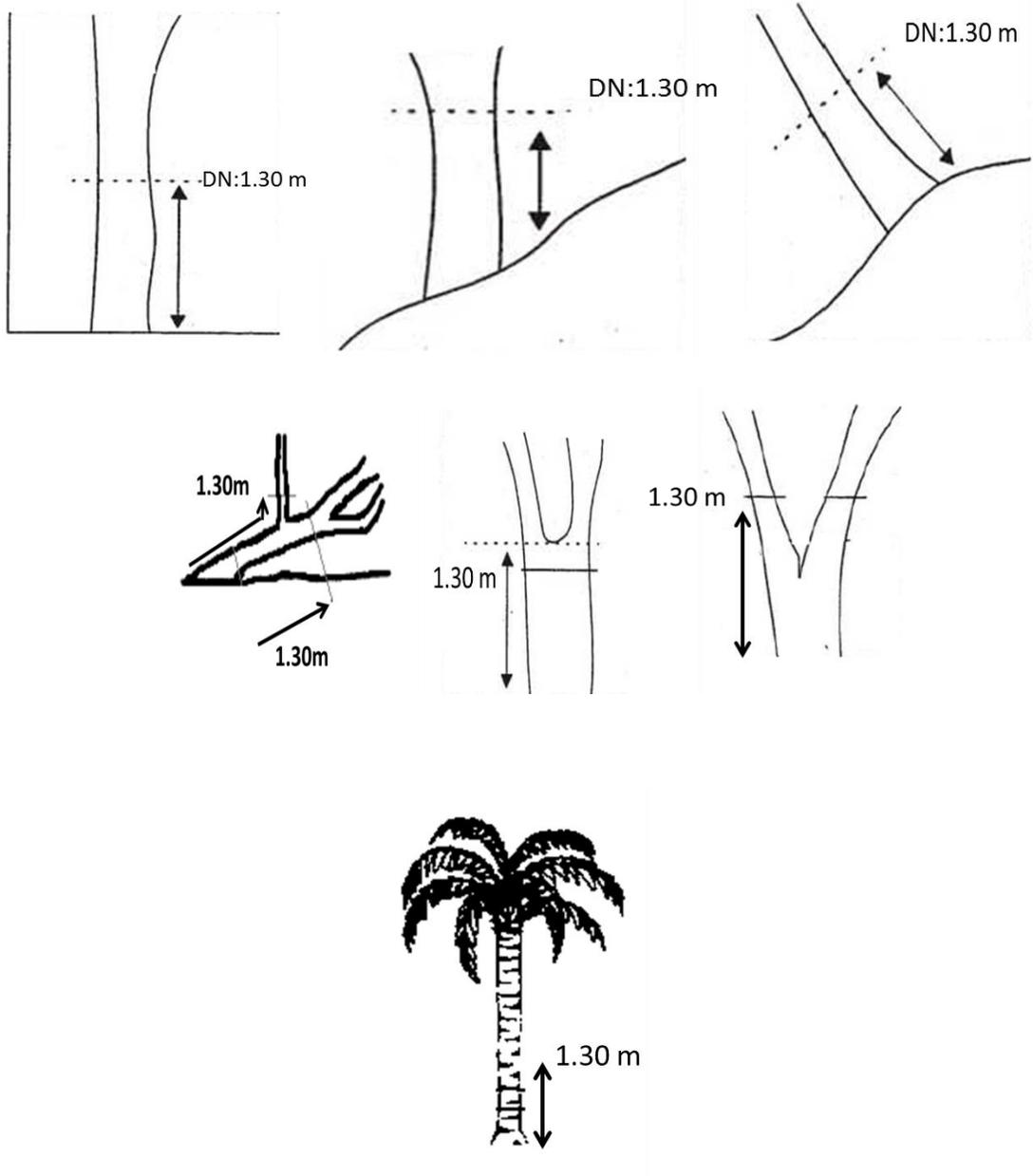
Foto: Gonzalo Sánchez Santos

7.-Se compensan las distancias, como se mencionó en el punto 5, para la delimitación de los sitios de 80 y 400 m²

8.-Para el trazo del sitio 3, se regresa al centro del conglomerado, y se traza una línea con cinta y brújula con azimut 120° . Se delimitan los círculos de 80 y 400 m² como se menciona en el punto 4.

9.- Para el trazo del sitio 4, se regresa al centro del conglomerado, y se traza una línea con cinta y brújula con azimut 240° . Se delimitan los círculos de 80 y 400 m² como se menciona en el punto 4.

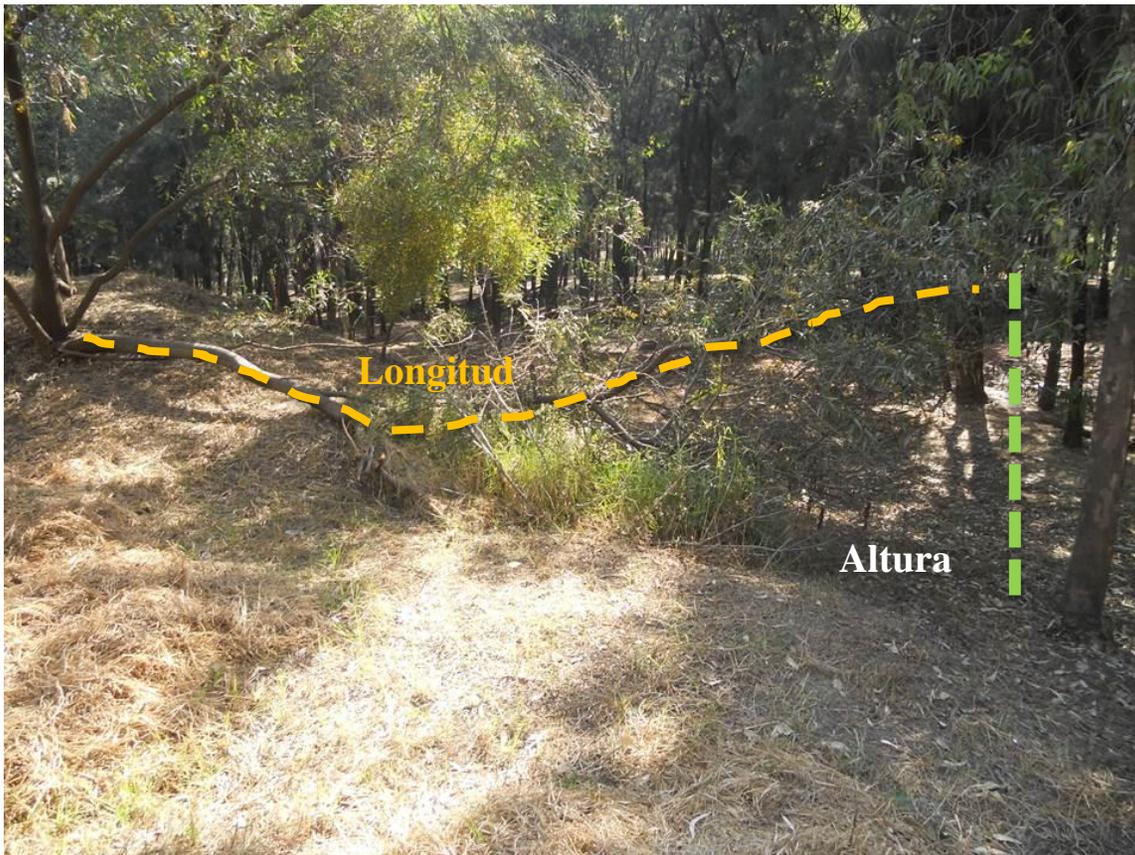
3.2 Algunos criterios para la medición del diámetro normal en plantas. Fuente: Estudio de caso SMIC Yucatán



3.3 Definición de Altura y longitud en una planta

Altura: Distancia vertical de la base a la parte más alta de la copa de la planta

Longitud: medida en metros desde la base a la parte más alta de la copa, siguiendo el tallo de la planta. En las plantas con posición vertical respecto al suelo, el valor de la altura y la longitud son iguales. Si la planta crece con un ángulo de inclinación respecto al suelo menor a 45° (imagen de abajo), habrá diferencia entre el valor de la altura y la longitud. En el ejemplo de la figura, si se utiliza el valor de la altura en una ecuación alométrica se sub-estimaría el valor de la biomasa.



Anexo 3.4 Tabla de captura en campo para arbolado

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
fecha	Numérico	Se refiere al periodo de medición en el SMIC del id_individuo
ciclo_de_medicion	Numérico	Marca el número de veces que se ha medido el id_individuo, en campo: 1,2, 3, n
id_etiqueta	Numérico	Es el número que concatena conglomerado, sitio, id_individuo y tallo.
folio (llave en Access)	Numérico	Es el número de conglomerado (1 a 32) en el SMIC
sitio	Numérico	Son los 4 sitios de la “ Y “invertida ” del conglomerado.
id_subsitio	Numérico	Se refiere al área dónde se midió el individuo (sí es el área de 80 m ² =1; 400 m ² = 2; y 1000 m ² =3
id_individuo	Numérico	Es el número consecutivo de cada árbol. Se expresa en números enteros
id_tallo	Numérico	Sí un id_individuo se ramifica por debajo de 1.3 m. se registrará cada tallo (poniendo número consecutivo a cada uno). Por cada id_individuo puede haber varios id_tallos. Se expresa en números enteros
id_especie	Numérico	Código que utiliza el INFyS para el nombre científico de las especies
nom_especie	Texto	Nombre científico (género especie) del id_individuo
forma_biológica	Numérico	1) Árbol 2)Arborescente 3)Plantas en penacho 4)Lianas y bejucos 5)Cañas 6)Arborescentes suculentas
id_ecuacion	Numérico	Número que identifica a los modelos alometricos que se utilizó para estimar la biomasa secqa del id_individuo

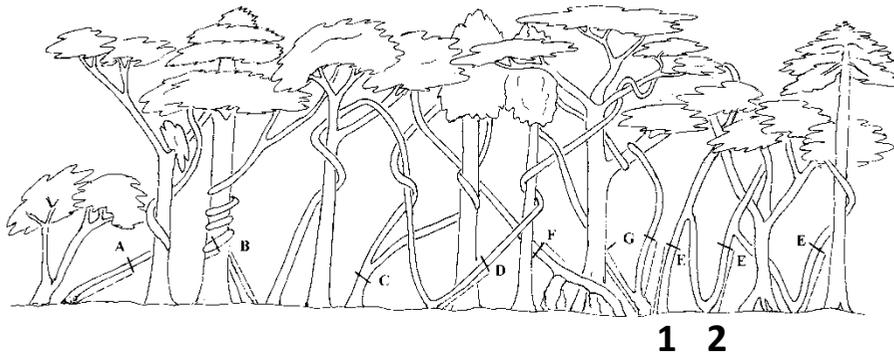
Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
dap	Numérico	Para homologar con la base de datos del INFyS, se deja Dap. El dato que se registra para los SMIC´s es el diámetro normal (diámetro a 1.3 m de altura del suelo).
h_total	Numérico	Es la distancia vertical de la base del árbol o de la superficie a la punta de la copa del árbol.
longitud_tallo	Numérico	Medición en metros desde la base a la parte más alta de la copa, siguiendo el tallo del árbol. (se anexa figura que explica altura y longitud)
d_copa_ns	Numérico	Diámetro de la copa del tallo o individuo en dirección norte-Sur.
d_copa_eo	Numérico	Diámetro de la copa del tallo o individuo en dirección norte-Sur
condicion	Numérico	De acuerdo a la clasificación del INFyS, 1= vivo; 2= muerto; 3=Tocón (es el trozo de tallo que queda de un árbol al ser aprovechado bajo condiciones de manejo o no. La altura de este para ser considerado tocón debe ser menor a 1.30m.)
cat_arboles_muertos	Numérico	Seguir la clasificación del protocolo de campo de los SMIC (tres clases propuestas por Brown), se anexa guía grafica de la clasificación. Se agregó en el catálogo de árboles muertos en pie, la categoría 4, árbol muerto sobre el piso
gravedad_especifica	Numérico	Gravedad específica para el caso de los árboles muertos en pie
densidad	Numérico	Densidad de la madera
fc	Numérico	Fracción de carbono
volumen	Numérico	Volumen para los árboles muertos en pie y los tocones
biomasa	Numérico	Peso seco del id_individuo
carbono	Numérico	carbono del id_individuo

id_capurista	Numérico	Es el número que identifica a la persona que capturó la información en determinado conglomerado y sitio
observaciones	Texto	Son datos que apoyan al análisis de la información

Anexo 3.5 Pasos para la cosecha de hierbas, arbustos y renuevos

- 1.-Se pesan las plantas cosechadas por forma de vida en una báscula con precisión de 0.01 g.
- 2.-Se fragmentan con machete para facilitar el empaquetado, y se etiquetan para ser llevadas al laboratorio.
- 3.- Sí para una forma de vida, la cantidad de biomasa fresca total es difícil de llevar a laboratorio, se toma una submuestra
- 4.- Es importante secar el material inmediatamente después de ser colectado en campo. Cada muestra se seca en una estufa a 70 °C hasta peso constante.
- 5.-Por parcela de 1 m², se registra el peso seco en gramos por forma de vida.

Anexo 3.6 Criterios para medir el diámetro normal a lianas (adecuado de Gerwing *et.al.*2006).



(A) lianas que ascienden hacia el dosel, se miden a 130 cm a lo largo del tallo desde el punto de enraizamiento principal;

(B) lianas que se enrollan en un tronco, se miden a lo largo del tallo de la liana 130 cm desde el punto de enraizamiento;

(C) lianas que se ramifican por debajo de 130 cm del punto de enraizamiento se miden 20 cm por debajo del punto de ramificación;

(D) lianas que su tallo viene de la copa de los árboles y se enraíza en el suelo, el diámetro se mide a 130 cm antes de ascender al dosel.

(E) las lianas que enraízan en los puntos 1 y 2 de la figura, se registrarán dos diámetros para un individuo, y el diámetro se medirá a 130 cm, solamente en los tallos que ascienden a la copa de los árboles;

(F) lianas que tienen raíces adventicias que abarcan hasta 80 cm desde la base del tallo, en estos casos, el punto donde se medirá el diámetro estará a 50 cm de la última raíz adventicia.

(G) lianas que se ramifican por debajo de 130 cm, pero con un tallo principal muy irregular o ramificación cerca de la tierra, se registra cada tallo por separado a 130 cm, considerando que vienen de un mismo individuo.

Anexo 3.7 Tabla de captura en campo y laboratorio para la cosecha en 1 m²

Campo

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
fecha	Numérico	Día, mes, año de la colecta de datos de cada parcela de 1 m ²
ciclo_medicion	Numérico	Veces que se ha cosecha una parcela de 1 m ² : 1, 2, 3, n
folio	Numérico	Es el número de conglomerado (1 a 32) en el SMI
sitio (llave en Access)	Numérico	Sitio de 400 m ² desde el que se trazó la parcela de 1 m ²
id_parcela	Numérico	Número de parcela donde se cosechó la biomasa (1,2, 3,4, 5 y 6). En el caso de incorporar nuevas parcelas en un conglomerado poner la numeración consecutiva: 7, 8, 9...n
forma_vida	Numérico	1=árbol(A); 2=arbusto(Ar); 3=palma(P), 4=liana(Li), 5=hierba(H), 6=Epifita(Ep), 7=Roseta(R),Maguey, piñuela, bromelia, agaves; 8=Suculenta(Suc)Nopales, 9=Otras(O) helechos, zamia, anturium,hongos

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_etiqueta_bolsa	Texto	Identificador en la etiqueta de la bolsa por componente. Los elementos que debe contener la etiqueta son: SMIC; CGL=Conglomerado; número de parcela en el que se hizo la cosecha; P1= parcela 1; a=árbol, p=palma, l=liana, h=hierba. Cada socio debe describir su id_etiqueta_bolsa, es decir que caracteres usó y qué significan
pft_g	Número	Peso fresco total
pf_subm	Número	Peso fresco de la submuestra (g). En el caso del SMIC Quintana Roo, este campo y el siguiente serán "NULL"
pst_muestra	Número	Peso Seco Total de lo que se cosechó en la parcela de 1 m ²
id_capurista	Numérico	Es el número que identifica a la persona que capturo la información en determinado conglomerado y sitio
observaciones	Texto	Son datos que apoyan al análisis de la información

Laboratorio

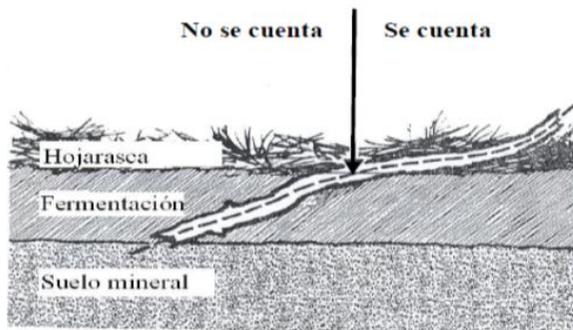
Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
fecha	Numérico	Día, mes, año, en el que se secó el contenido de cada bolsa
folio	Numérico	Conglomerado al que pertenece el sitio donde se obtuvo la id_etiqueta_bolsa
sitio	Numérico	sitio donde se obtuvo la id_etiqueta_bolsa
id_parcela	Numérico	Corresponde al número de sitio donde se tomó la muestra
id_etiqueta_bolsa	Texto	Identificador en la etiqueta de la bolsa por componente. Los elementos que debe contener la etiqueta son: SMIC; número de parcela en el que se hizo la cosecha; P1= parcela 1; a=árbol, p=palma, l=liana, h=hierba. Cada socio debe describir su id_etiqueta_bolsa, es decir que caracteres usó y qué significan
pft_g	Número	Peso fresco total
pftsubm_g	Número	Peso fresco de la submuestra
ps_g	Numérico	Peso seco de cada id_etiqueta_bolsa
fracc_seca	Número	Cociente del peso seco entre peso fresco
biomasa	Numérico	Peso de la muestra.
id_capurista	Numérico	Es el número que identifica a la persona que capturo la información en determinado conglomerado y sitio
observaciones	Texto	Se anotan las observaciones de las muestras que sean de relevancia o que afecten en el análisis de los datos.

Anexo 3.8 Criterios para medir el mlc de acuerdo a Brown, 1974. Imágenes INFyS, 2012. Fotografías Gonzalo Sánchez Santos y Juan Pablo Caamal Sosa

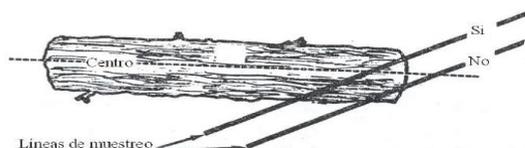
Para decidir que madera la línea de intersección medir, se seguirá el protocolo del INFyS para materiales combustibles, con base en Brown, 1974:

1. Las partículas que se incluyen en la medición de las intersecciones son todos los combustibles leñosos muertos que provienen de árboles y arbustos y que se encuentran sobre el suelo de un bosque (ej. ramas y troncos) y que se hayan separado de la fuente original de crecimiento. Por lo tanto, las ramas muertas que están unidas a un tronco muerto en pie no son contadas. No se consideran los conos, la corteza, hojas, pastos y hierbas.

2.-Todas las ramas y ramillas que se encuentran dentro o sobre el mantillo superficial son contadas, pero no se consideran cuando el eje central de la partícula intersectada se encuentra en la capa de fermentación.



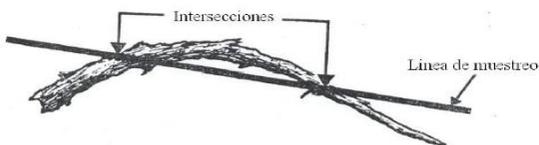
3. Cuando una troza es intersectada en la parte final de la línea de muestreo, sólo se mide si su eje central es cruzado por la línea de muestreo. La línea de muestreo debe cruzar el eje central de la troza para ser medida (Tomado de Brown 1974).



4. No se mide ninguna pieza en la cual su eje central coincida perfectamente con la línea de muestreo



5. Si la línea de muestreo cruza en dos ocasiones una pieza que esta curvada, se mide cada intersección



6. Se miden las astillas y trozas que quedan después de un aprovechamiento. En el caso de las astillas (pedazos de madera que no tiene una forma geométrica), es más fácil pesarla y tener el peso seco por el porcentaje de materia seca, y el carbono mediante una muestra para determinación en laboratorio (si se da el caso).

7. Medir tocones que estén o no enraizados y raíces que no estén cubiertas por tierra. Para medirlos se deben considerar como troncos individuales o raíces individuales.

8. Para las trozas muy podridas que están despedazadas y ya perdieron la estructura original, se debe reconstruir visualmente la forma cilíndrica que contenga el material podrido y estimar el diámetro. Una alternativa en estos casos, se puede obtener el peso

de la troza con ayuda de una grúa manual, a base de sistema de poleas y cadena y una báscula de gancho digital, con 0.1 g de escala, y tener el peso seco por el porcentaje de materia seca, y el carbono mediante una muestra (si se da el caso).

9. Cuando haya “montones” de madera derivadas de aprovechamiento forestal o de ramas caídas por huracanes, se evaluarán todas las maderas que se intersecten con la perpendicular, considerando los criterios 1 al 7 descritos arriba, para ser medidos



Anexo 3.9 Tabla de captura en campo y laboratorio para la material leñoso caído

Campo

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_proyecto	Numérico	Nombre del SMIC. Puede haber un catálogo: 1) Campeche, 2) Chiapas, 3) Hidalgo, 4) Q.Roo y 5) Yucatán
fecha	Fecha	Día, mes, año de la colecta de datos por transecto (“+”)
folio	Numérico	Es el número de conglomerado (1 a 32) en el que se colectó el dato
id_transecto	Numérico	Número de “+” dentro del conglomerado (1,2 3).
id_linea	Numérico	Nº de línea en la que se colectó el dato “+” (1,2 3, 4)
distancia	Numérico	Es la distancia a la cual se midió la muestra 1=4m, 2=8m, 3=15m. (Atopixco y Kiuic). Finos = 5m; medianos= 10; gruesos = 20 m Qroo
porc_pendiente	Numérico	Inclinación del terreno donde se trazó cada línea del transecto (expresada en %). Solo se registra una pendiente por línea de “+”
id_mlc	Numérico	1=Fino; 2= mediano; 3=Grueso
nom_especie	Texto	
dureza	Texto	De acuerdo a la GE de la especie, duro, blando , intermedio
id_grupo_especie	Numérico	1= Latifoliadas; 2=Pino
clase_descomposicion	Numérico	Clases (1 a 5) de acuerdo a Wadell, 2002
diametro_pieza	Numérico	Valor del diámetro en cm, donde la línea de intersección toca la pieza de mlc
long_pieza	Numérico	Longitud de la pieza de mlc (cm)
id_capturista	Numérico	Es el número que identifica a la persona que capturo la información en determinado conglomerado y sitio
observaciones	Texto	Se anotan las observaciones de las muestras que sean de relevancia o que afecten en el análisis de los datos

Laboratorio

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_proyecto	Numérico	Nombre del SMIC. Puede haber un catálogo: 1) Campeche, 2) Chiapas, 3) Hidalgo, 4) Q.Roo y 5) Yucatán
fecha_colecta	Fecha	Día, mes, año, en el que se colectó la muestra de mlc en campo
folio	Numérico	Es el número de conglomerado (1 a 32) en el SMIC
id_mlc	Numérico	1=Fino; 2= mediano; 3=Grueso
id_especie	Texto	Nombre botánico de la pieza de mlc, de acuerdo al catálogo de especies del INFyS
dureza	Texto	De acuerdo a la GE de la especie, duro, blando , intermedio
id_grupo_especie	Numérico	1= Latifoliadas; 2=Pino
clase_descomposicion	Numérico	Clases (1 a 5) de acuerdo a Wadell, 2002
id_muestra_para_determinacion_carbono	Texto	Los elementos que debe contener la etiqueta son: SMIC; CGL=Conglomerado; número de conglomerado en el que se hizo la colecta; tipo de mlc; clase de descomposición. Cada socio debe describir su id_muestra, es decir que caracteres usó y qué significan
peso_muestra	Numérico	Peso seco en kg
vol_seco	Numérico	Volumen en m ³ , obtenido por desplazamiento en agua de la muestra de mlc seca
grav_especifica	Numérico	Peso seco entre volumen seco (kg/m ³)
id_capturista	Numérico	Es el número que identifica a la persona que capturo la información en determinado conglomerado y sitio
observaciones	Texto	Se anotan las observaciones de las muestras que sean de relevancia o que afecten en el análisis de los datos

Anexo 3.10 Clases de descomposición según Wadell 2002. Fotografías Gonzalo Sánchez Santos y David López Merlín.

Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
1	Dura	Intacta, no putrefacta	Color original	Si las ramas están presentes, tienen ramas finas que están bien sujetas y el tronco presenta corteza



Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
2	Duramen duro; albura en algún grado de putrefacción	La mayor parte intacta, albura parcialmente.	Color original	Si hay ramas presentes, ya no tiene muchas ramas finas y la corteza se empieza a caer.



Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
3	Duramen duro; el tronco soporta su propio peso	Secciones grandes de la albura pueden separarse con la mano	Café rojizo o color original	La base de ramas grandes no pueden ser separadas



Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
4	duramen podrido, el tronco no soporta su peso, pero mantiene su forma	Suave, pequeñas piezas en bloque. Con una punta metálica se puede separar el duramen	Rojo-café o café claro	Las bases de ramas grandes pueden separarse fácilmente.



Clase de descomposición	Integridad estructural	Textura de la madera	Color de la madera	Condición de ramas y ramitas
5	No tiene integridad estructural, no mantiene su forma	Suave, la madera se hace polvo cuando está seca	Rojo-Café a café obscuro	Las estructuras de ramas están completamente putrefactas



Anexo 3.11 Equipo, herramientas y papelería útil para el muestreo de mantillo

- Un marco que puede ser de plástico o madera
- Cuchillo
- Machete
- Etiquetas
- Bolsas de papel y plástico
- Marcadores
- Balanza.

Anexo 3.12 Procedimiento del muestreo de mantillo en los Sitios de la Red Mex-SMIC

- Ubicar el punto de muestreo y colocar el marco tomando como centro el punto asignado.
- Fijar el marco, puede ser con clavos o estacas pequeñas, de modo que no se mueva con la manipulación y toma de muestras. El tamaño del marco se define de acuerdo a las condiciones del sitio, generalmente se utilizan marcos de 30x30 cm o 50x50 cm.
- Cortar el material al borde del marco con ayuda de un cuchillo o machete, para separar el material que está al interior del marco. Retirar los residuos que quedan alrededor del marco; con esto se evita tomar material que no está al interior del área de muestreo y se facilita la toma de la muestra.
- Identificar la primera capa del mantillo, hojas recién caídas y bien diferenciadas, y tomar la profundidad de dicha capa. Para ello dividir el área de muestreo en cuartos, y medir la profundidad de la capa en el centro de los cuatro cuadrantes.
- Registrar la información en los formatos de campo y tomar la muestra de la primera capa; colocar la muestra en una bolsa de papel o plástico debidamente etiquetada.
- Identificar la siguiente capa, material descompuesto pero aún reconocible, y tomar su profundidad en los cuatro cuadrantes.
- Tomar la muestra y colocarla en una bolsa etiquetada, identificando la capa.
- Identificar la tercera capa del mantillo, materia orgánica muy descompuesta de la cual no se reconoce su origen. Medir la profundidad al centro de los cuadrantes y registrarla.
- Tomar la muestra de la tercera capa y colocarla en una bolsa etiquetada.
- Llevar las muestras al laboratorio y ponerlas a secar inmediatamente, para evitar que la descomposición siga avanzando y disminuya la masa de la muestra.

Nota 1. Recordar que no en todos los sitios se encuentran las 3 capas; el número de capas dependerá del tipo de ecosistema y de la temporada de muestreo.

Nota 2. Si la muestra por capa es muy grande y se complica llevar toda la muestra, se puede tomar una submuestra. Para ello es necesario registrar en campo el peso en húmedo de la muestra total, revolverla perfectamente para homogeneizarla, dividirla en cuartos y tomar uno de ellos como submuestra. Si la cantidad sigue siendo muy grande, volver a homogeneizar y cuartear hasta tener una muestra adecuada. Registrar el peso húmedo de la submuestra que se lleva al laboratorio, para poder hacer el ajuste del peso por la humedad del material.

Nota 3. Tener cuidado de no tomar suelo mineral, si no se distingue, tomar solo lo que se reconoce como capa orgánica; esto es importante porque puede afectar en la determinación del contenido de carbono de la muestra y en el peso relacionado a la misma.

Anexo 3.13 Formato para registro de datos de mantillo en campo y laboratorio

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_proyecto	Numérico	Nombre del SMIC. Puede haber un catálogo: 1) Campeche, 2) Chiapas, 3) Hidalgo, 4) Q.Roo y 5) Yucatán
folio	Numérico	Número de conglomerado en el que se colecta la información de mantillo (del 1-32).
sitio (llave)	Numérico	Número del sitio de 400 m ² dentro del conglomerado donde se colectó la información de mantillo.
fecha_colecta	Fecha	Fecha (día, mes, año) de cuando se realizó la colecta de suelo.
punto_muestreo	Numérico	Se refiere al punto de muestreo dentro del sitio de 400 m ² .
tipo_muestra	Texto	El tipo de material, referente a la capa orgánica: m (hojas recién caídas y completas), f (material medianamente descompuesto pero que aún se identifican estructuras), y h (material muy descompuesto y no se reconoce).
id_muestra	AlfaNumérico	Clave que caracteriza a la muestra y que tiene la siguiente información: SMIC, conglomerado, sitio, punto de muestreo, tipo de material (m, f o h), fecha.
area_m2	Numérico	Área de muestreo, 0.09 m ² (cuadro de 30 x 30 cm) y 0.25 m ² (cuadro de 50 x 50

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
		cm), en metros cuadrados.
prof_c1	Numérico	Profundidad de la capa en el cuadrante 1 del área de muestreo, en milímetros.
prof_c2	Numérico	Profundidad de la capa en el cuadrante 2 del área de muestreo, en milímetros.
prof_c3	Numérico	Profundidad del mantillo en el cuadrante 3 del área de muestreo, en milímetros.
prof_c4	Numérico	Profundidad del mantillo en el cuadrante 4 del área de muestreo, en milímetros.
prof_cen	Numérico	Se refiere a la profundidad de la capa en el centro del área de muestreo, en milímetros.
prof_prom	Numérico	Promedio de la profundidad de la capa, de los 4 o 5 puntos tomados.
pf_tot	Numérico	Peso fresco total por capa, en gramos.
pf_subm	Numérico	Peso fresco de la submuestra de la capa, en gramos.
ps_subm	Numérico	Peso seco de la submuestra, en gramos.
fracc_seca	Numérico	Fracción seca del material, peso seco de la submuestra entre el peso húmedo de la submuestra.
ps_tot	Numérico	Peso fresco total de la capa H, en gramos.
conc_c	Numérico	Concentración de carbono reportada por el laboratorio, en porcentaje.
conc_n	Numérico	Concentración de nitrógeno, en porcentaje.
co_mantillo	Numérico	Contenido de carbono en las capas orgánicas del suelo, g/m ² (ps_tot

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
		*conc_c)/100).
id_capturista	Numérico	Identificador Numérico de la persona encargada de capturar los datos, de acuerdo con el catálogo.

Anexo 3.14 Métodos para la medición de la densidad aparente del suelo.

	<p>Método del terrón</p> <p>Comúnmente utilizado en suelos con una buena estructura, y por lo tanto se forman grandes agregados. Se extrae un agregado grande y se cubre con parafina, una vez que se ha secado la parafina se mide el volumen por desplazamiento de agua (Lichter y Costello 1994). Este no es un método adecuado para los suelos arenosos.</p>
	<p>Método del núcleo</p> <p>Este es el método más común y simple, consiste en tomar una muestra de suelo con un cilindro de volumen conocido, con lo cual se puede intensificar el muestreo. No es recomendable para suelos muy pedregosos ya que excluye de la muestra piedras mayores al diámetro del cilindro, y puede compactar la muestra (Lichter y Costello 1994, Burton y Pregitzer 2008). Al usar este método se debe tener cuidado para evitar que queden huecos al interior del cilindro.</p>
	<p>Método de excavación</p> <p>Este método también se conoce como hueco volumétrico y consiste en cavar un hueco del cual se extrae todo el material, se obtiene el peso y volumen de los componentes (tierra fina, piedras y raíces; Burton y Pregitzer 2008, Vadeboncoeur <i>et al.</i> 2012).</p>

Anexo 3.15 Procedimiento del muestreo del suelo en los Sitios de la Red Mex-SMIC

- Una vez que se ha ubicado el punto de muestreo, tomar las muestras de las capas orgánicas y limpiar cuidadosamente la superficie del suelo mineral.
- En el punto de muestreo colocar un marco de madera o plástico, de 30 x 30 cm, fijarlo con ayuda de estacas para evitar que se mueva mientras se realiza la excavación.
- Cavar el hueco hasta la profundidad definida. Tener cuidado de no pasarse, revisando constantemente la profundidad.
- Una vez alcanzada la profundidad, homogeneizar el piso del hueco así como las paredes. En algunos suelos con alto contenido de piedras no siempre se podrá llegar a la profundidad señalada, por ello se registra la profundidad real a la cual se llegó, para tener un dato de profundidad más preciso; este dato se registra dividiendo en cuadrantes el área de muestreo.
- Medir el volumen del hueco usando agua o algún otro material que tenga una densidad parecida al agua. Cubrir el hueco con tela o plástico y vaciar el material elegido, midiendo con un recipiente graduado el volumen requerido para llenarlo. Cuidar que al llenar el hueco se haga hasta el nivel en donde comienza el suelo mineral y no el límite del marco.
- El material extraído del hueco, colocarlo sobre una lona y tamizarlo con una malla de 12 mm de apertura, a modo de separar las piedras grandes, raíces y la fracción de tierra fina.
- Pesar todas las piedras que no pasaron por el tamiz; después tomar una submuestra de piedras para llevarlas al laboratorio y estimar su densidad (peso/volumen).
- Las raíces, separarlas en una bolsa de plástico o papel, etiquetarlas y llevarlas al laboratorio para ser procesadas.
- La parte fina que pasó por el tamiz, pesarla y homogeneizarla perfectamente para tomar una submuestra representativa que se llevará al laboratorio; es necesario tomar el peso en fresco de la submuestra. Tomar una segunda submuestra para hacer la determinación del contenido de humedad del suelo, anotar el peso en húmedo.
- Tener cuidado de etiquetar bien la muestra y de amarrar con bien la bolsa.

Nota 1. Para los sitios en los cuales el muestreo es de -10, 10-20, 20-30, 30-50 y >50 cm, seguir este mismo procedimiento para cada profundidad, cuidando de marcar la profundidad a la cual se hizo la muestra anterior y no cuantificar volumen de más.

Nota 2. Hacer la medición del volumen del hueco con un recipiente graduado lo más preciso posible.

Nota 3. *Si las muestras se secan antes de haberlas limpiado/enjuagado, será más difícil eliminarles lo residuos de suelo, aunque se podrían re-hidratar para limpiarlas mejor.*

Anexo 3.16 Formato para registro de datos de suelo en campo y laboratorio

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_proyecto	Numérico	Nombre del SMIC. Puede haber un catálogo: 1) Campeche, 2) Chiapas, 3) Hidalgo, 4) Q.Roo y 5) Yucatán.
folio	Numérico	Número de conglomerado en el que se colecta la información de mantillo (del 1-32).
sitio (llave en Access)	Numérico	Número del sitio de 400 m ² dentro del conglomerado donde se colectó la información de mantillo.
fecha_colecta	Fecha	Fecha (día, mes, año) de cuando se realizó la colecta de suelo.
tipo_muestra	Texto	El tipo de material de la muestra, en este caso es suelo (s).
id_capa_cm	Texto	Profundidad de la capa de muestreo, de acuerdo al catálogo. 1= 0-10; 2=10-20, 3= 20-30, 4=30-40, 5=40-50, 6= >50, 7= 30-50, 8= 0-30.
id_muestra	AlfaNumérico	Clave que caractericé la muestra y que deberá tener la siguiente información: conglomerado, sitio, profundidad y tipo de material (s).
area_m2	Numérico	Área de muestreo, 0.09 m ² (cuadro de 30 x 30 cm) y 0.25 m ² (cuadro de 50 x 50 cm), en metros cuadrados.
prof_c1_cm	Numérico	Profundidad del suelo en el cuadrante 1 del área de muestreo (cuadrante del noroeste), en centímetros y por capa.
prof_c2_cm	Numérico	Profundidad del suelo en el cuadrante 2 del área de muestreo (cuadrante del noreste), en centímetros y por capa.
prof_c3_cm	Numérico	Profundidad del suelo en el cuadrante 3 del área de muestreo (cuadrante del sureste), en centímetros y por capa.
prof_c4_cm	Numérico	Profundidad del suelo en el

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
		cuadrante 4 del área de muestreo (cuadrante del suroeste), en centímetros y por capa.
prof_cen	Numérico	Profundidad en el punto central del cuadro, en centímetros y por capa.
prof_prom	Numérico	Profundidad promedio de los 4 o 5 puntos del área de muestreo.
prof_max	Numérico	Profundidad máxima medida en el centro del cuadro de muestreo, en centímetros.
pft_s_g	Numérico	Peso fresco total de todo el suelo obtenido en el hueco (fracción <12 mm), en gramos.
pftsub_s_g	Numérico	Peso fresco de la submuestra de suelo para laboratorio del socio, en gramos.
vol_tot_ml	Numérico	Volumen total del hueco, que es la cantidad de perlita utilizada para llenar el hueco de muestreo, en mililitros (equivalente a cm ³).
pftot_p_g	Numérico	Peso fresco total de las piedras en el hueco, >12 mm, en gramos.
pftsub_p_g	Numérico	Peso fresco de la submuestra de piedras para la estimación de la densidad, en gramos.
volsub_p_cm3	Numérico	Volumen de la submuestra de piedras obtenido por desplazamiento de agua, en centímetros cuadrados.
dp_gcm3	Numérico	Densidad de la submuestra de piedra, en gramos por centímetro cúbico (peso seco /volumen seco).
dprom_p_gcm3	Numérico	Densidad promedio de las piedras a nivel de conglomerado.
pftsubp2_12mm_g	Numérico	Peso fresco de la submuestra de suelo para determinar el contenido de piedras de 2-12 mm.
psp2_12mm_g	Numérico	Peso de las piedras 2-12 mm.
factor_p2_12mm	Numérico	Factor de corrección para las piedras de 2-12 mm.
pftsub_hum_s_g	Numérico	Peso fresco de la submuestra de suelo para determinación de

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
		humedad, en gramos
pssub_hum_s_g	Numérico	Peso seco del suelo de la submuestra para humedad, en centímetros.
fracc_seca	Numérico	Fracción seca del material, peso seco de la submuestra entre el peso húmedo de la misma.
ps_tot_s_g	Numérico	Peso seco total del suelo <12 mm, corregido por humedad, en gramos.
ps_tot2_s_g	Numérico	Peso seco total del suelo <12 mm, corregido por las piedras de 2-12 mm, en gramos.
p_p2_12_g	Numérico	Peso seco de las piedras de 2-12 mm
p_tot_p_g	Numérico	Peso total de las piedras >2 mm, suma de las piedras en campo y la fracción de 2-12 mm.
pstot_r_g	Numérico	Peso seco total de las raíces, en gramos.
da	Numérico	Densidad aparente del suelo, masa del suelo fino (<2mm)/volumen TOTAL.
conc_cos	Numérico	Concentración de carbono orgánico en el suelo, en porcentaje.
cos_g_m2	Numérico	Contenido de carbono orgánico en el suelo, g/m ² .
id_capturista	Numérico	Nombre del encargado de capturar los datos

Anexo 3.17 Procedimiento del muestreo de raíces en los Sitios de la Red Mex-SMIC.

En campo

- Por capa de muestreo del suelo, se saca todo el material del hueco (área de 30 x 30 cm) y se tamiza con una malla de 12 mm de apertura.
- Separar todas las raíces que no pasan por el tamiz y colocarlas en una bolsa de papel o plástico previamente etiquetada.
- El material que pasó por el tamiz, se pesa (peso fresco).
- Sobre una lona colocar del material y homogeneizarlo cuidadosamente, para tomar una submuestra representativa de la muestra original.
- Se guarda la submuestra en una bolsa de plástico y se registra el peso húmedo.

En laboratorio

- Las raíces que se separaron en campo, se llevan al laboratorio, una vez ahí se enjuagan, con agua destilada (de preferencia), para eliminar los restos de otros residuos orgánicos y de la fracción mineral del suelo.
- Las raíces se escurren para eliminar el exceso de humedad y posteriormente se colocan en el horno para ser secadas a 60 °C, hasta peso constante.
- Una vez secas se registra el peso seco.
- La submuestra del material que pasó el tamiz de 12 mm, se pone a secar, al aire y a la sombra; puede colocarse en una charola de plástico o de aluminio. Durante este secado, es necesario deshacer diariamente los agregados que se formen, para facilitar el procesamiento posterior.
- Una vez seca la muestra, se pesa nuevamente.
- El material se tamiza por segunda ocasión, pero ahora a malla de 2 mm de apertura. Para asegurar que todo el suelo mineral pase por el tamiz, si es necesario se puede moler en un mortero o con un mazo de madera.
- Separar las raíces que no pasen por el tamiz, limpiarlas de otros residuos, secar en el horno a 60 °C, hasta peso constante; registrar el peso seco.

Nota 1. Las raíces pueden separarse por clases diamétricas, si es de interés conocer el aporte de los distintos tamaños de raíces.

Nota 2. También se pueden separar las raíces en vivas y muertas, en la medida de lo posible. Las raíces vivas son de color blancuzco y tiene una apariencia turgente.

Anexo 3.18 Formato para registro de datos de raíces en campo y laboratorio

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
id_proyecto	Numérico	Nombre del SMIC. Puede haber un catálogo: 1) Campeche, 2) Chiapas, 3) Hidalgo, 4) Q.Roo y 5) Yucatán.
folio	Numérico	Número de conglomerado en el que se colecta la información de mantillo (del 1-32).
sitio (llave)	Numérico	Número del sitio de 400 m ² dentro del conglomerado donde se colectó la información de mantillo.
fecha_colecta	Fecha	Fecha (día, mes, año) de cuando se realizó la colecta en campo.
id_capa	Numérico	Profundidad de la capa de muestreo, de acuerdo al catálogo. 1= 0-10; 2=10-20, 3= 20-30, 4=30-40, 5=40-50, 6= >50, 7= 30-50, 8= 0-30.
id_muestra	Numérico y Texto	Clave que caracteriza a la muestra y que tiene la siguiente información: conglomerado, sitio, punto de muestreo, tipo de material (r), fecha.
area_m2	Numérico	Área de muestreo, 0.09 m ² (cuadro de 30 x 30 cm) y 0.25 m ² (cuadro de 50 x 50 cm), en metros cuadrados.
id_clase_diam	Numérico	Clase diamétrica a la cual pertenece la muestra de raíces. 1 = <0.5 cm; 2= >0.5 cm; 3 = <0.2, 4 = 0.2-0.5, 5 = 0.5-2 cm; 6 = >2 cm.
id_clase_diam_colpos	Numérico	Es la clase diamétrica re-agrupada, para el caso del SMIC-Yucatán. Las clases son las mismas que la columna anterior. 1 = <0.5 cm; 2= >0.5 cm; 3 = <0.2, 4 = 0.2-0.5, 5 = 0.5-2 cm; 6 = >2 cm.
condicion	Numérico	Condición de las raíces. De acuerdo a catálogo 1= vivo, 2=muerto.
pf_tot_r	Numérico	Peso fresco total de raíces, en gramos.
ps_tot_r	Numérico	Peso seco total de raíces, en gramos.
con_c	Numérico	Concentración de carbono reportada

Nombre del campo	Tipo de campo	Descripción
		por el laboratorio, en porcentaje.
co_r	Numérico	Contenido de carbono en raíces, g/m ² (ps_tot *conc_c/100).
id_capturista	Numérico	Nombre del encargado de capturar los datos.

Anexo 3.19 Pasos para el control de calidad de datos de variables dasométricas

El proceso de control de calidad de datos en la Red Mex SMIC, se realizó con un Script en el programa R. Las variables que se analizaron son diámetro y altura que generalmente son las variables insumo para ecuaciones alométricas. Se describen a continuación los pasos que considera el Script:

- 1) Se obtienen las estadísticas descriptivas de los datos. Para cada especie, se identifican las estadísticas descriptivas (media, mediana, desviación estándar, valor máximo y mínimo) de las variables: altura, diámetro normal y diámetro de copa.
- 2) Se Identifican las especies sub-representadas. Para el caso de los SMIC se definió que una especie sub-representada es aquella que cuenta con un número menor a 10 individuos reportados en la base de datos. Este criterio se puede ajustar dependiendo del objetivo que se busca. Para este subconjunto de especies se desarrolló una base resumen que permitió revisar los datos de manera manual con criterios técnicos.
- 3) Se identifican las especies bien representadas. Se definió que una especie está bien representada cuando el número de individuos por especie es igual o mayor a 10. Para este subconjunto de especies, se desarrolló un control de calidad automatizado de las variables altura, diámetro normal, diámetro de copa, conforme a los siguientes criterios:

Se normalizan las variables para cada especie:

Se transforma la variable z_i

$$z_i = (x_i - \bar{x}) / s$$

Donde:

z_i : un valor de una variable estandarizada

x_i : una observación de la variable de interés

\bar{x} : el promedio de la variable de interés

s : la desviación estándar de la variable de interés

- 4) Se identifican los valores atípicos con el criterio 3.5σ (desviaciones estándar). Se crea una base en la que para cada variable se identifican los individuos cuyo valor de “z” fue mayor a 3.5. Se tomó el criterio de 3.5σ , ya que las mediciones en campo siguieron el protocolo de colecta de datos en campo y en caso de haber una medición errónea, ésta se rectificó.
- 5) Se obtienen las estadísticas descriptivas de las especies bien representadas excluyendo los valores atípicos (individuos cuyo valor de “z” fue mayor a 3.5).

- 6) Se obtienen las estadísticas descriptivas de los valores atípicos y se revisan con criterio de experto.
- 7) En escritorio se revisan los valores atípicos de las especies medidas con el conocimiento de los coordinadores de campo. Posteriormente, con los datos depurados en la revisión en escritorio, se realiza una verificación en campo.

Anexo 3.20 Descripción del procedimiento automatizado en el programa R para estimar el reservorio de carbono en los SMIC

1. Tener la base de datos con el cálculo de la biomasa y carbono a nivel de individuo.
2. Separar los individuos que se encuentran bajo la condición 1 (vivos), ya que la base de datos también considera a los árboles muertos en pie y tocones.

Árboles vivos con DN de 2.5 a 7.5 cm

3. De los individuos vivos, elegir los árboles con diámetro menor a 7.5 cm.
4. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de cada sitio de 80 m², sumando el carbono de todos los individuos.
5. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio de 80 m².
6. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.
7. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo del estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello se considera que los individuos con DN de 2.5 a 7.5 cm se midieron en parcelas de 0.008 ha..
8. Contar el número de conglomerados y sitios de 80 m², por estrato.

Árboles vivos con DN de 7.5 a 20 cm

9. De la base de datos de individuos vivos, elegir aquellos con diámetro normal de entre 7.5 y 20 cm.
10. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de sitio de 400 m², sumando el carbono de todos los individuos.
11. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio de 400 m².
12. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.
13. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo el estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con DN de 7.5 a 20 cm se midieron en parcelas de 0.04 ha.

14. Contar el número de conglomerados y sitios de 400 m², por estrato.

Árboles vivos con DN >20 cm

15. De la base de datos de individuos vivos, elegir aquellos con diámetro normal mayor a 20 cm.

16. Agrupar el contenido de carbono por individuo a nivel de sitio de 400 y 1000 m² sumando el carbono de todos los individuos.

17. Asignar el estrato al que pertenece cada sitio periférico de 400 m².y el central de 1000 m²

18. Revisar los datos y eliminar aquellos sitios que no tengan un valor de carbono en la biomasa de esta categoría diamétrica.

19. Agregar los datos a nivel de estrato a partir del cálculo del estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con DN >20 cm se midieron en parcelas de 0.04 ha y 0.1 ha, por lo que se debe asignar el área de manera diferencial.

20. Contar el número de conglomerados y sitios periféricos de 400 m² y el central de 1000 m², por estrato.

Biomasa <2.5 cm de DN

21. Obtener el dato de carbono por superficie de muestreo.

22. Agregar los datos de carbono a nivel de sitio de 400 m².

23. Asignar un estrato a cada sitio de 400 m². Se consideró que el estrato de cada parcela de 1m² correspondía al del sitio de 400 m² más cercano.

24. Calcular el estimador de razón por hectárea, su varianza e incertidumbre. Para ello considerar que los individuos con DN >20 cm se midieron en parcelas de 0.04 ha y 0.1 ha, por lo que se debe asignar el área de manera diferencial. Para ello se crean variables nuevas: el contenido de carbono al cuadrado, contenido de carbono por área, y el cuadrado del área de cada estrato.

25. Para hacer la estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea, se agregan todos los datos (promedio de carbono, varianza e incertidumbre) de los cuatro componentes, por estrato.

26. Se suman todos los componentes para tener el contenido de carbono total en la biomasa aérea.
27. Se propaga la incertidumbre del almacén de carbono en la biomasa aérea a nivel de SMIC.

Anexo 5.1. Comparación de las principales características, insumos requeridos, principales resultados y sistemas en los que pueden ser empleados los modelos de contabilidad de carbono seleccionados.

Modelo	Características	Insumos	Resultados	Sistema
CBM-CFS3	Simula la dinámica del carbono asociada a la biomasa, MOM y suelo a nivel de rodal y paisaje.	<i>Variables de sitio:</i> área, edad, volumen y especies dominantes del bosque, e historia de uso. <i>Biomasa:</i> tasa de crecimiento y recambio de la biomasa, tasa de producción de la hojarasca, tasa de transferencia asociada a disturbios (naturales y antropogénicos), factores de expansión de biomasa. <i>MOM:</i> tasas de descomposición del mantillo no leñoso/raíces finas, madera muerta fina, madera muerta gruesa sobre el suelo, madera muerta en pie y MO humificada. <i>Disturbios:</i> matrices de disturbio (transferencia entre los almacenes terrestres y la atmósfera), y área perturbada anualmente por tipo de disturbio.	Cuantifica el contenido de carbono y emisiones/remociones de carbono asociado a la biomasa (aérea y subterránea), MOM (mantillo y madera muerta) y suelo, a través de diferentes escalas temporales y espaciales. Cuantifica los impactos del manejo y el cambio de uso del suelo. Proporciona las estimaciones de emisiones para CO ₂ y otros GEI distintos al CO ₂ , PPN, PEN y PBN.	Bosques, aforestación, reforestación y deforestación pero no considera usos del suelo no forestales. Bosques degradados. Proyectos de compensación de carbono.
Biome-BGC	Simula los ciclos del C, N, y agua así como procesos físicos de radiación y disponibilidad del agua.	<i>Variables climáticas:</i> temperatura del aire y precipitación (diarios). <i>Variables de sitio:</i> presión parcial del vapor de agua flujo de radiación de onda corta, duración del día, información ecofisiológica de la vegetación.	Cuantifica los almacenes y flujos de C, N y agua, la PPN y IEN. Frecuencia: diario/mensual/anual.	Bosques.
FullCAM	Grupo de modelos que da seguimiento a las emisiones de C y N derivadas de las actividades en sistemas agrícolas y bosques.	<i>Variables de sitio:</i> información satelital (uso del suelo), clima, inventarios forestales, productos maderables, crecimiento de los árboles, mantillo y suelos.	Estima los flujos de C y N en diferentes escalas espaciales y temporales. Frecuencia: diario/semanal/mensual/anual.	Sistemas agrícolas y mixtos, bosques (aforestación, reforestación y deforestación).
CO2FIX	Simula la dinámica del carbono en especies individuales y grupos de especies a nivel de rodal en sistemas forestales y agroforestales.	<i>Variables climáticas:</i> temperatura media anual. <i>Variables de sitio:</i> biomasa máxima en el rodal, incrementos anuales medios, duración de la rotación, contenido de carbono inicial, densidad de la madera, tasa de competencia de las especies y tasa de mortalidad.	Estimaciones del contenido de carbono y los flujos de carbono en biomasa, madera muerta, mantillo, COS y la extracción de productos maderables. Frecuencia: anual.	Bosques y sistemas agroforestales. Proyectos de bioenergía y de MDL para créditos de carbono.

CENTURY	Simula la dinámica de la MOS y de nutrientes (N, P y S), la producción vegetal y el balance de agua.	<i>Variables climáticas:</i> temperatura del aire y precipitación (mensual). <i>Variables de sitio:</i> textura del suelo, contenido de C, N, P, S y lignina en el material vegetal, ingreso de N atmosférico y del suelo. <i>Condiciones iniciales:</i> contenido de C, N, P y S en el suelo.	Cuantifica el contenido total de carbono, nutrientes y agua en el suelo, y los cambios ambientales y de manejo. Frecuencia: mensual.	Sistemas agrícolas, pastizales, sabanas y bosques.
RothC	Simula el recambio del COS. Corre de forma <i>predictiva e inversa</i> .	<i>Variables climáticas:</i> temperatura del aire, precipitación y evaporación (mensual). <i>Variables de sitio:</i> contenido de arcilla del suelo, ingreso mensual de residuos vegetal, descomposición de los residuos vegetal (relación RVD/RVR), abonos, profundidad de la capa del suelo muestreado y cobertura del suelo. <i>Condiciones iniciales:</i> contenido de COS, biomasa microbiana, MOI.	Estima el recambio anual del COS y los efectos del tipo de suelo, temperatura, contenido de humedad y cobertura vegetal. Frecuencia: mensual.	Suelo de sistemas agrícolas, pastizales y bosques.
Yasso07	Simula la dinámica del COS.	<i>Variables climáticas:</i> temperatura del aire, precipitación y evaporación (mensual/anual). <i>Variables de sitio:</i> ingreso anual de residuos vegetales, tasas de descomposición del mantillo foliar y del mantillo leñoso. <i>Condiciones iniciales:</i> contenido de COS en cinco compartimentos químicos.	Calcula el contenido de COS, la respiración heterotrófica y los cambios debidos al cambio de uso del suelo y al manejo. Frecuencia: anual.	Suelo de bosques.

C: carbono; COS: carbono orgánico del suelo; GEI: gases de efecto invernadero; IEN: intercambio ecosistémico neto; MDL: mecanismo de desarrollo limpio; MO: materia orgánica; MOI: materia orgánica inerte; MOM: materia orgánica muerta; N: nitrógeno; P: fósforo; PBN: Productividad del bioma neta; PNE: Productividad ecosistémica neta; PPN: Productividad primaria neta; S: azufre; RVD: residuos vegetales de lenta descomposición; RVR: residuos vegetales resistentes a la descomposición.