



## COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS



CAMPUS MONTECILLO

# Estudio de Caso del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono en Hidalgo

**Elaboró**

**Gregorio Ángeles Pérez**

**Benjamín Méndez López**

**René Valdez Lazalde**

**F. Ofelia Plascencia Escalante**

**Héctor M. de los Santos Posadas**

**Griselda Chávez Aguilar**

**Alma Delia Ortiz Reyes**

**Ma. de los Ángeles Soriano Luna**

**Zaira Zaragoza Castañeda**

**Eddy Ventura Palomeque**

**Alfredo Martínez López**

**Craig Wayson**

**David López Merlín**

**Marcela Olgún Álvarez**

**Oswaldo Carrillo Negrete**

**Vanessa Maldonado Montero**

Montecillo, México. Diciembre de 2015

## Contenido

Capítulo	Título	Pág.
	Prefacio	5
	Agradecimientos	7
	Abreviaturas y acrónimos	8
CAPÍTULO I	Introducción	9
CAPÍTULO II	Sitio de medición intensiva del carbono en Hidalgo	11
	Antecedentes	11
	• Ubicación	12
	• Topografía	14
	• Clima	14
	• Vegetación	14
	Objetivos del SMIC-Hidalgo	14
	Diseño del SMIC-Hidalgo	15
	Diseño de las Unidades de Muestreo	15
	<b>Establecimiento de las unidades de muestreo</b>	18
CAPÍTULO III	Biomasa aérea	19
	<i>a. Diseño de muestreo en campo</i>	19
	• Arbolado (diámetro >2.5 cm)	19
	• Medición del diámetro normal	22
	• <b>Medición de la altura total v longitud total de</b>	23
	• Biomasa menor (diámetro <2.5 cm)	25
	• Procesamiento de muestras en laboratorio	26
	• Re-medición de la biomasa aérea	28
	<i>b. Estimación del carbono en la biomasa aérea</i>	28
	• Enfoque de estimación del carbono forestal	28
	• Arbolado	29
CAPÍTULO IV	Madera muerta	
	A. Diseño de muestreo en campo	31
	• Árboles muertos en pie y tocones	31
	• Material leñoso caído	32
	B. Estimación del carbono en la madera muerta	37
	• Árboles muertos en pie y tocones	37
	• Material leñoso caído	38

CAPÍTULO V	Componentes subterráneos	40
	A. Diseño de muestreo en campo	40
	• Mantillo	40
	• <b>Muestreo de las capas orgánicas del suelo</b>	41
	• <b>Procesamiento de muestras en laboratorio</b>	41
	• Materia orgánica del suelo	42
	• <b>Densidad aparente del suelo</b>	44
	• <b>Procesamiento de muestras en laboratorio</b>	45
	✓ Suelo	45
	✓ <b>Estimación del volumen de las piedras</b>	45
	✓ <b>Estimación del volumen de las raíces</b>	45
	✓ <b>Estimación del volumen del suelo</b>	46
	• Biomasa subterránea: raíces	46
	B. Estimación del carbono en los componentes	48
	• Mantillo	48
	• Suelo	50
CAPÍTULO VI	Flujos del carbono forestal	51
	A. Producción de hojarasca	51
	• Diseño de muestreo en campo	51
	• Estimación de la transferencia de carbono vía	53
	B. Descomposición del material foliar	56
	• Diseño de muestreo en campo	56
	• Estimación de la tasa de descomposición de	58
	C. Descomposición del material leñoso	61
	• Diseño de muestreo en campo	61
	• <b>Colecta de ramas en campo y Secado del</b>	64
	D. Producción de raíces	65
	• Núcleos de crecimiento interno	65
	✓ Diseño de muestreo en campo	66
	✓ Estimación del recambio de raíces	68
	• Minirizotrón	72
	E. Flujos de carbono del suelo	74
	• Diseño de muestreo en campo	74
CAPÍTULO VII	Intercambio de carbono entre el ecosistema y la atmósfera	76
	A. Sensores remotos	76
	• Datos LiDAR	77
	• Software	78
	• Información de campo	78
	• Resultados	79

	• Consideraciones finales	84
CAPÍTULO VIII	Dinámica del carbono en el SMIC-Hidalgo	85
	A. Retos	85
	B. Sigüientes pasos	86
Anexos		88
Bibliografía		102

## Prefacio

Como parte del convenio entre los Gobiernos de Noruega y los Estados Unidos Mexicanos, a través de un Memorándum de Entendimiento, firmado el jueves 27 de mayo de 2010, se implementa el proyecto denominado “Fortalecimiento de la Preparación REDD+ en México y Fomento de la Cooperación Sur-Sur”. Dicho memorándum se firmó el 20 de junio de 2011 entre La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo-México (PNUE-México), con el financiamiento del Gobierno de Noruega.

El Proyecto surge del interés de fomentar la cooperación entre ambos países respecto a la implementación de estrategias y políticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por deforestación y degradación forestal, así como aumentar la captura de GEI mediante la conservación y el manejo sustentable de los bosques, y el mejoramiento de las reservas forestales de carbono (REDD+).

El proyecto está dirigido a revertir la degradación ambiental, conservar los recursos naturales, promover la gestión participativa, la gobernabilidad de los recursos naturales y la promoción del desarrollo humano, a través de políticas y programas de desarrollo sostenible. Particularmente en las actividades de mediano plazo del proyecto se contempla el desarrollo y la implementación de un sistema operacional de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las emisiones y remociones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) cuyos datos de actividad deben ofrecer información anual del cambio de uso de la tierra, así como investigación metodológica de otros sistemas MRV multiescala.

Para ello, el proyecto promueve la coordinación y cooperación entre los diferentes actores, a fin de conjuntar sus esfuerzos y recursos dentro del ámbito de sus respectivas competencias y de conformidad con las disposiciones aplicables, para impulsar la ejecución y promoción de actividades para el desarrollo e implementación del sistema MRV.

Así mismo, el proyecto reconoce que una manera de apoyar el desarrollo e implementación de un sistema de MRV, indispensable en una estrategia REDD+, es mediante la exploración de

modelos que permitan estimar los almacenes y los flujos de carbono forestal con menor grado de incertidumbre. Una vez calibradas y validadas estas herramientas, resultan una opción costo-efectiva para la implementación de los sistemas MRV a diferentes escalas espaciales (i.e. nacional, subnacional y local) y temporales (i.e. histórica y futura).

Es por ello que el proyecto establece en sus arreglos institucionales que la mayor parte de las actividades presentadas en el marco de resultados requerirá de la coordinación con otras instituciones y organizaciones nacionales que actuarán como socios del proyecto, a fin de buscar sinergias y apoyar el desarrollo de las capacidades nacionales en la materia.

En mayo del 2012, especialistas del proyecto, investigadores de instituciones académicas y miembros de Organizaciones de la Sociedad Civil, acordaron en la ciudad de México la formación de una Red de Sitios de Monitoreo Intensivo de Carbono en REDD+ (Red Mex-SMIC). Esta red tiene el objetivo de recopilar, generar e intercambiar información científica necesaria para el uso de modelos ecosistémicos, en la caracterización de la dinámica del carbono en paisajes forestales estratégicos e importantes por su contribución en la emisión y remoción de GEI del sector forestal del país.

## Agradecimientos

Al Proyecto de Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur (México-Noruega), a la Agencia para el Desarrollo Internacional y Servicio Forestal de los Estados Unidos de América por el financiamiento de las actividades en sus diferentes etapas del proyecto.

Al Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, por las facilidades otorgadas en el uso de instalaciones y equipo de laboratorio.

A las autoridades ejidales y habitantes de los ejidos Atopixco, La Mojonera, El Reparo, Tzincoatlán, Zahuastipán, Santo Domingo, y pequeña propiedad de Eulalio Santos.

A los estudiantes: Wenceslao Santiago García, Disraelí Hernández Pérez, Ahmed Cruz Leyva, Griselda Chávez Aguilar, Ma. de los Ángeles Soriano Luna, Alma Delia Ortiz Reyes, Esteban Martínez, Edy Ventura Palomeque, Zaira Zaragoza Castañeda, Alfredo Martínez López, Teresa Martínez.

A los técnicos de campo: Odettee I. Cadena Morales, Oscar López Molinar, Fray Cruz Ruiz, Adrián González Soto, Francisco Martínez, Ramón Razo, Alfredo Aguilar.

A los técnicos comunitarios: Don Irineo, Don Socorro, Don Refugio.

## Abreviaturas y acrónimos.

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

DN: Diámetro normal

GEI: Gases Efecto Invernadero

INFyS: Inventario Nacional Forestal y de Suelos

MRV: Monitoreo, Reporte y Verificación

SMIC: Sitios de Monitoreo Intensivo de Carbono

PMN: Proyecto México-Noruega

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Red SMIC: Red de Sitios de Monitoreo Intensivo de Carbono

REDD+: Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal.

## CAPÍTULO I. Introducción

En el año 2012 se estableció una red de sitios denominado “Red Mex-SMIC, Sitios de Monitoreo Intensivo de Carbono”, en paisajes forestales de México, relevantes por su contribución a la emisión y remoción de CO<sub>2</sub> atmosférico. Esta red permitirá obtener información necesaria para la calibración-validación de modelos de la dinámica del carbono forestal. Los criterios de selección de estos sitios de acuerdo con Olgúin *et. al.* (2012) fueron los siguientes:

- Representan paisajes con una contribución importante al balance neto de emisiones de gases de efecto invernadero del sector forestal en el país.
- Permiten un soporte multi-institucional, que facilita la generación/disponibilidad de datos para los modelos (gobierno, academia, organizaciones de la sociedad civil).
- Contribuyen con otras iniciativas nacionales e internacionales (acciones tempranas REDD+ previstas por CONAFOR, Servicio Forestal de Estados Unidos, Proyecto M-REDD).

Los SMIC se relacionan con el proceso de “Consolidación institucional de la estimación de los contenidos de carbono forestal y sus cambios en México” que es otro de los componentes del Proyecto México Noruega, a través de:

- Proporcionar información detallada de reservorios y flujos de carbono, complementando así vacíos de datos a nivel sub-nacional.
- Valorar la pertinencia costo-efectiva del uso de modelos de dinámica de carbono
- Generar pautas para la colecta de información en campo que pueden ser aplicadas a los puntos de verificación de la estimación nacional de carbono

Los SMIC son una iniciativa que surgió de la necesidad de coordinar esfuerzos entre el componente de modelización de la dinámica del carbono del PMN y proyectos de investigación sobre la acumulación de biomasa y carbono que están en desarrollo. En este sentido, el Colegio

de Postgraduados, con el financiamiento de la Agencia para el Desarrollo Internacional y con el soporte técnico del Servicio Forestal de los Estados Unidos de América, inició la operación por gestión propia, de una torre de flujo de CO<sub>2</sub>, vapor de agua y energía que utiliza la técnica de covarianza de torbellinos (“Eddy covariance”) en el Estado de Hidalgo. El proyecto contemplaba además, el establecimiento de una red de parcelas permanentes para analizar el crecimiento y mortalidad de rodales forestales, y su contribución a la acumulación de biomasa y carbono en sistemas bajo manejo. Asimismo, las estimaciones en campo estarían ligadas a un sistema de medición a través de sensores remotos de diferente resolución espacial y temporal, incluyendo un vuelo de LiDAR (Ángeles-Pérez et al, 2012).

Con la intención de generar sinergia, el PMN y el Colegio de Postgraduados establecieron un acuerdo de colaboración para desarrollar trabajos de campo para obtener información para la calibración de modelos. La idea es utilizar tanto el enfoque “top-down” (sensores remotos) como “bottom up” (colecta de datos en campo) para este análisis a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales.

En este documento se hace un recuento del proceso de levantamiento de datos de campo, análisis de laboratorio y principales resultados de las estimaciones de reservorios y flujos de carbono a nivel paisaje del SMIC-Hidalgo.. El objetivo del presente informe es mostrar los avances en el establecimiento del SMIC Hidalgo y detalles en la implementación de la metodología, la obtención de datos de campo y base de datos histórica derivada de la revisión de literatura del área de estudio.

## CAPÍTULO II. Sitio de medición intensiva del carbono en Hidalgo

### Antecedentes

Localizada en la Sierra Madre Oriental, la región forestal Zacualtipán-Molango en el estado de Hidalgo, representa la un macizo forestal compuesto por Bosques de Pino-Encino, Bosques de Encino y Bosque Mesófilo de Montaña. Esta región se caracteriza por su relieve accidentado con grandes cañadas y barrancas, culminada en su parte alta con una meseta. Recibe directamente la humedad proveniente del Golfo de México, la cual moldea los mosaicos de vegetación existentes.

La gran diversidad de ambiente hacen de esta región altamente productiva, razón por la cual la mayoría de los ejidos asentados en la zona iniciaron desde finales de la década de los 70's el aprovechamiento de sus recursos forestales. Ejidos como La Mojonera, Tzincoatlán, El Reparo, Santo Domingo, y Atopixco, tienen un programa de manejo forestal para la producción de madera. En esta región, el manejo forestal inició a principios de la década de los 80's a través del Método de Desarrollo Silvícola con base en el método de regeneración de Árboles Semilleros (Árboles Padres). En las últimas tres décadas, el manejo del bosque se ha encaminado a desarrollar bosques coetáneos dominados por *Pinus patula*. Actualmente se tiene una cronosecuencia de cerca de 35 años.

El Postgrado Forestal del Colegio de Postgraduados, atendiendo una solicitud de colaboración con técnicos forestales locales, inició un programa de investigación con el objetivo de mejorar el sistema de manejo forestal practicado en la región. De particular interés fue el diseño de prácticas silviculturales que permitiera el establecimiento de las especies de interés comercial como el *Pinus patula* y *P. teocote* (Ángeles-Pérez et al., 1995). Así mismo, se instaló una red de sitios de medición permanentes tendientes a evaluar el crecimiento y mortalidad de rodales bajo manejo, con el objetivo de generar guías de densidad que permitiera maximizar el aprovechamiento de la capacidad productiva del sitio, a través de la generación de secuelas de aclareo acordes a las especies comerciales de interés.

La información sobre el crecimiento de los rodales, se complementó con estudios de estructura y procesos de regeneración del bosque (Jarillo-Hernández, 2006, Godínez-Ibarra, 2007, Flores-Ortega, 2008), la dinámica de acumulación de biomasa y carbono en los rodales (Cruz-Martínez, 1997, Figueroa-Navarro, 2010, Bautista, 2008, Ordoñez-Prado, 2009, Anacleto-García, 2006, Cadena-Morales, 2006, Vázquez-Ibañez, 2008, Aguirre-Salado, 2009, Avilés-Hernández, 2009). Dada la información preexistente, se consideró que en esta región se podría establecer un sitio de medición intensiva de carbono siguiendo la propuesta metodológica de Hollinger (2008). Para ello se tomaron en cuenta consideraciones de operatividad, cooperación local, logística y de producción. Junto con actores locales, se seleccionó el sitio donde se colocaría la torre de flujo. A partir de este punto, se delimitó un polígono de 3 X 3 km dividido en nueve cuadros de 1 km<sup>2</sup> (Hollinger, 2008).

## Ubicación

El SMIC Hidalgo se localiza en los ejidos Atopixco, La Mojonera, El Reparo, Tzincuatlán, Zahuastipán, Santo Domingo y pequeña propiedad de Eulalio Santos, en el Municipio de Zacualtipán de Ángeles. Se localiza entre las coordenadas 20°40'17" y 20°34'51" N, 98°40'07" y 98°34'22" W.

Los suelos son de origen volcánico (Rzedowski y Madrigal-Sánchez, 1972), generalmente profundos y ricos en materia orgánica. Es común encontrar luvisoles órticos y crómicos, así como cambisoles éutricos (INEGI, 1992).

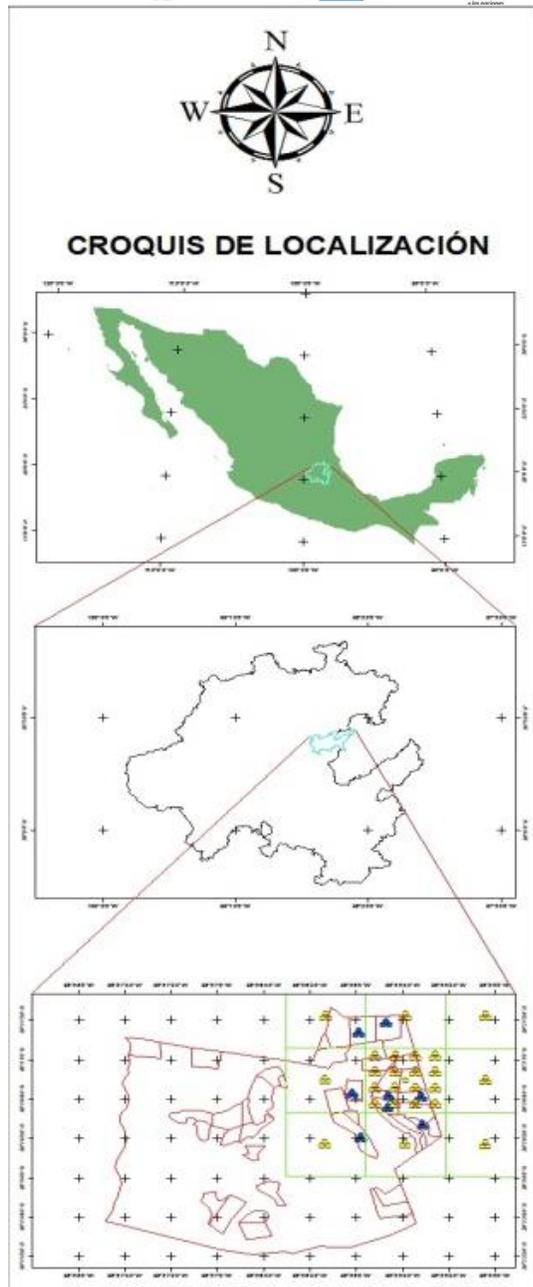


Figura 1. Localización del SMIC Hidalgo.

Topografía

La región presenta topografía variable; desde zonas elevadas con pendientes suaves, hasta terrenos con pendientes pronunciadas, esta región se ubica en la Sierra Madre Oriental (Martínez-Morales, 2004) (Figura 1).

### Clima

El clima predominante es C(fm)w”b(e)g, templado-húmedo con una estación marcada de lluvias entre junio y octubre (García, 1981). La temperatura media anual es de 13.5 °C y 2050 mm de precipitación (Rzedowski y Madrigal-Sánchez, 1972). Debido a que el sitio se localiza en una de las partes más altas de la Sierra Madre Oriental (2000 a 2200 m s.n.m.) es común observar un gran número de días con neblinas. Por tanto, la mayor parte del año la humedad relativa permanece alta.

### Vegetación

Los tipos de vegetación predominantes son: bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, y bosque de pino-encino. Entre las especies arbóreas dominantes se encuentran *Pinus patula*, *Quercus crassifolia*, *Q. affinis*, *Q. laurina*, *Q. sartori*, *Q. excelsa*, *Q. xalapensis*, *Clethra mexicana*, *C. pringlei*, *Magnolia schiedeana*, *Cornus disciflora*, *Viburnum* spp., *Cleyera theaoides*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina*, *Vaccinium leucanthum*, *Liquidambar styraciflua*, *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*, *Podocarpus reichei*, *Cercis canadensis*, entre otras (Rzedowski y Madrigal-Sánchez, 1972).

### Objetivos del SMIC-Hidalgo

- Determinar el efecto del manejo forestal sobre la productividad de rodales y dinámica de carbono, y su influencia a nivel paisaje.
- Analizar las tasas de acumulación de biomasa y carbono utilizando el enfoque de cronosecuencias para determinar el momento en que el rodal después de la cosecha, pasa de ser una fuente neta para convertirse en un sumidero neto de carbono.

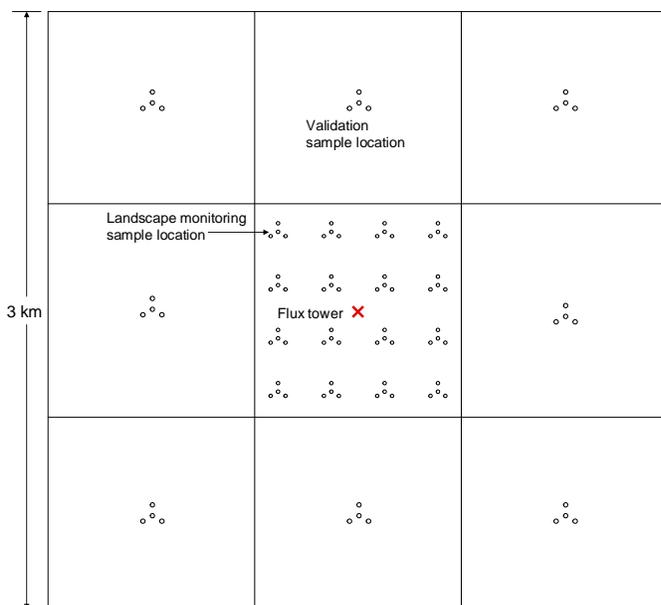
- Comparar diferentes metodologías para determinar la productividad de rodales en el sitio, a y través de la técnica de Eddy Covariance, parcelas permanentes de medición y sensores remotos.
- Diseñar la metodología más apropiada para la colecta, análisis de los datos y sistematización de la información para la estimación de reservorios y flujos del carbono a escala de paisaje en el SMIC Hidalgo.
- Mejora el conocimiento científico de largo plazo y proponer practicas silviculturales sustentables para el manejo de los bosques de la región.
- Proveer de datos finos para la parametrización y calibración de modelos de empíricos y de procesos sobre dinámica del carbono a escalas regional y nacional.
- Identificar áreas de investigación futura de relevancia para este sitio

## Diseño del SMIC-Hidalgo

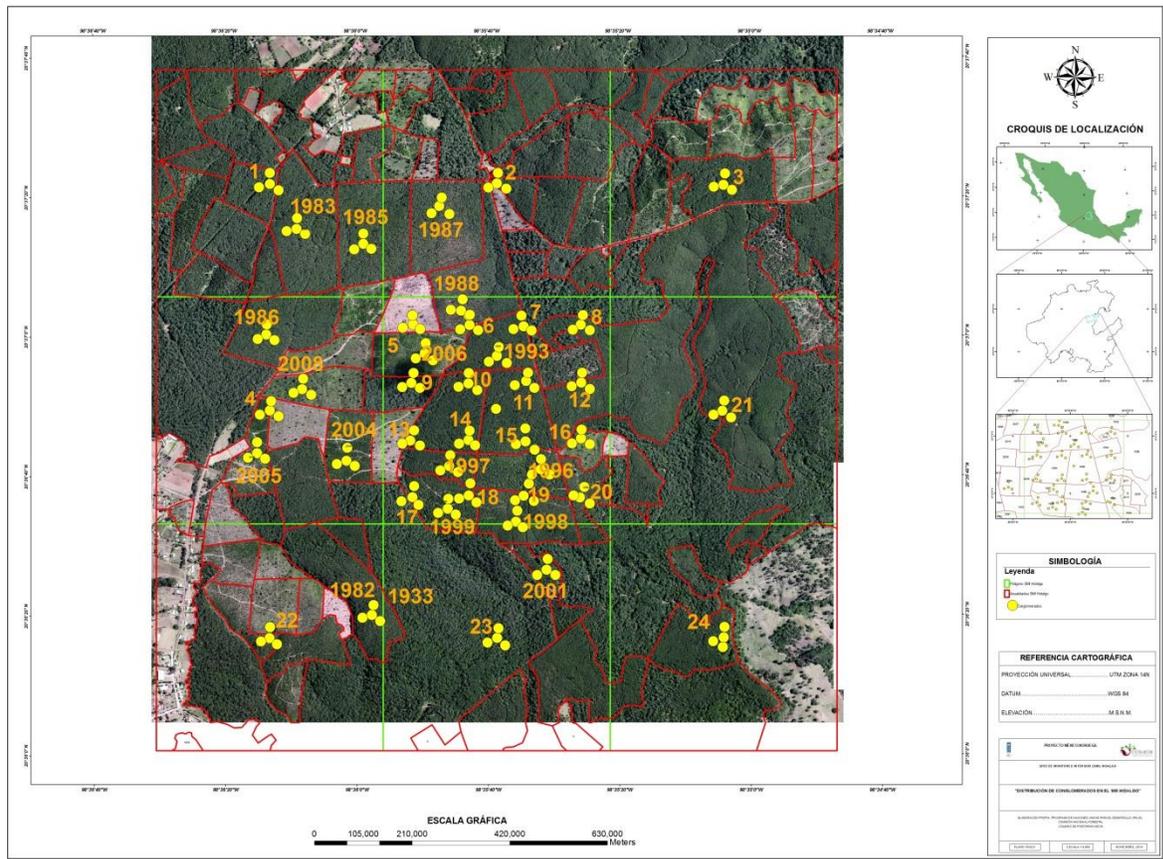
### Diseño de las unidades de muestreo y sus componentes

De acuerdo a la metodología de diseño del sitio intensivo sugerida por Hollinger (2008), se estableció un polígono de 3 X 3 km (900 ha) dentro del paisaje forestal (Figura 2). Con la intención de relacionar información sobre los reservorios y flujos de carbono a escala de paisaje a través de diferentes fuentes de información, en el centro del polígono se localizó una torre de flujos de CO<sub>2</sub> (torre de Eddy covariance). En el cuadro de 1 km<sup>2</sup> central, se establecieron 16 unidades de muestreo (conglomerados) con arreglo sistemático, similares a las utilizadas por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal. Adicionalmente en el centro de los 8 km<sup>2</sup>, se estableció una unidad de muestreo, lo que da un total de 24 unidades de muestreo dispuestas de manera sistemática. Asimismo, el área de 9 km<sup>2</sup> fue dividida en rodales señalados por el año de corta, donde adicional a las 24 unidades de muestreo localizadas en forma sistemática, se establecieron 16 unidades más localizadas en rodales de diferente edad bajo el enfoque de cronosecuencias. De esta forma, se establecieron 40 unidades de muestre en total (Figura 3).

La información de campo que se obtenga para la estimación de reservorios y flujos de carbono se comparará con las estimaciones obtenidas a través de la torre de flujo, y sensores remotos. El objetivo es obtener información de la dinámica de carbono que pueda ser utilizada para determinar la contribución potencial de bosques bajo manejo, en la remoción de CO<sub>2</sub> atmosférico, y generar escenarios futuros mediante modelos de simulación de dinámica de carbono.



**Figura 2.** Esquema de muestreo idealizado para el sitio de medición intensiva de carbono forestal (Fuente: Hollinger, 2008).



**Figura 3.** Mapa del sitio de monitoreo intensivo de carbono (SMIC) Hidalgo con la ubicación de las unidades de muestreo y anualidades.

### **Establecimiento de las unidades de muestreo.**

Se delimitó el polígono de 9 km<sup>2</sup>, dividido en 9 cuadros de 1 km<sup>2</sup> (Figura 2). En el centro del km<sup>2</sup> central, se ubicó la torre de flujo. Posteriormente, utilizando fotografías aéreas y con verificación en campo a través de GPS, el área se rodalizó en polígonos de acuerdo al año de cosecha (anualidad). El bosque no cosechado se le asignó una edad aproximada de 80 años.

Se establecieron en forma sistemática 24 unidades de muestreo permanentes similares a las utilizadas por el INFyS. Cada unidad de muestreo permanente, a la cual se le denominó unidad de muestreo primaria, estuvo constituida por 4 unidades de muestreo secundarias de 400 m<sup>2</sup>, dispuestas en forma de “Y” invertida (CONAFOR, 2012). En el km<sup>2</sup> central alrededor de la torre, se establecieron 16 unidades con una distancia entre ellas de 250 m. Las 8 restantes, se establecieron en el centro de los 8 km<sup>2</sup> circundantes (Figura 3). Para la localización de las unidades permanentes de muestreo se ubicó el centro de cada una con ayuda de un geoposicionador GPS Garmin con información geoespacial previa de gabinete. Una vez establecida la unidad secundaria central, se procedió a delimitar las siguientes unidades secundarias, es decir la 2, 3 y 4. El centro de cada unidad secundaria fue marcado por una estaca de PVC.

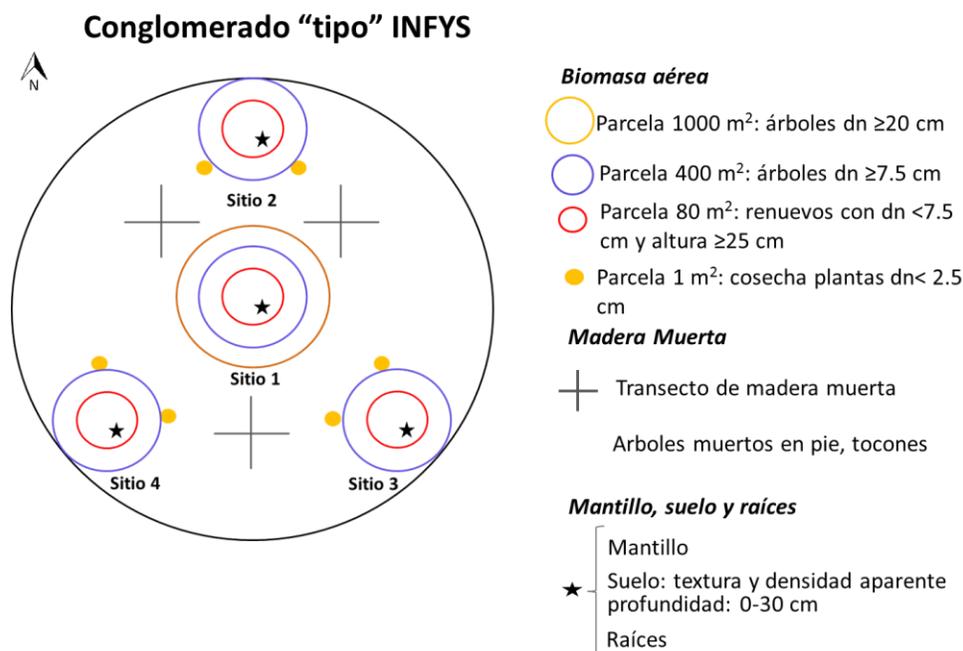
Debido a que el establecimiento sistemático de las 24 unidades de muestreo permanentes no incluían todas las anualidades; o bien la unidad de muestreo primaria se encontraba entre dos anualidades no caracterizando exclusivamente una anualidad en particular, se establecieron 16 unidades de muestreo primarias en cronosecuencia. Es decir, se determinaron las anualidades que ya estaban caracterizadas en las 24 unidades de muestreo con arreglo sistemático, y las 16 unidades adicionales, se establecieron en anualidades no incluidas.

## CAPÍTULO III. Biomasa aérea

### A. Diseño de muestreo en campo

- **Arbolado (diámetro >2.5 cm)**

El diseño de la unidad de muestreo permanente fue tipo INFyS para el levantamiento de información de campo para estimar los reservorios y flujos de carbono (Figura 4). Una vez localizado los centros de cada unidad secundaria, se procedió a la delimitación una área circular de 80 m<sup>2</sup> (radio de 5.04 m) y una de 400 m<sup>2</sup> (radio de 11.28 m) tomado en cuenta la compensación por pendiente del terreno. En la unidad secundaria 1, además se delimitó un sitio de 1000 m<sup>2</sup> (radio de 17.84 m).



**Figura 4.** Diseño del conglomerado tipo INFyS con sitios circulares para la colecta de información para las estimaciones de carbono. (Tomado de López-Merlín et al., 2014).

En las parcelas de 80 m<sup>2</sup> se midieron árboles, arbustos, lianas y palmas con diámetro normal (DN) mayor a 2.5 cm pero menor a 5 cm. La numeración se inició a partir del árbol más cercano al norte al azimut 0°, siguiendo las manecillas del reloj. Se registró el nombre científico y/o común, el diámetro, la altura y longitud de cada individuo. A cada individuo se le marcó el DN con aerosol y cinta fluorescente. Además, se colocó una etiqueta de aluminio en la base del árbol con el número del individuo, con la finalidad de realizar futuras re-mediciones en el mismo individuo.

En la unidad de muestreo secundaria de 400 m<sup>2</sup> se midieron las plantas leñosas con DN  $\geq$  5 cm. Los individuos se contabilizaron a partir del árbol más cercano al norte (0°), siguiendo las manecillas del reloj. A cada individuo se le registró el nombre científico y/o común, DN de cada tallo, altura y longitud, y diámetro de copa en dos direcciones (norte-sur, este-oeste). También se anotó la condición del árbol (vivo o muerto). Se marcó el punto de medición del DN con aerosol y cinta fluorescente y se colocó una etiqueta de aluminio en la base del árbol con el número del individuo, con la finalidad de realizar futuras re-mediciones.

En la parcela de 1000 m<sup>2</sup> se midieron los árboles con dn  $\geq$  20 cm. Los individuos se contabilizaron a partir del árbol más cercano al norte (0°), siguiendo las manecillas del reloj. Se registró el nombre científico y común, diámetro normal de cada tallo, altura, longitud total y diámetro de copa en dos direcciones (norte-sur, este-oeste). Se marcó el punto donde se midió el DN con aerosol y cinta fluorescente y se colocó una etiqueta de aluminio en la base del árbol con el número del individuo, con la finalidad de realizar futuras re-mediciones.

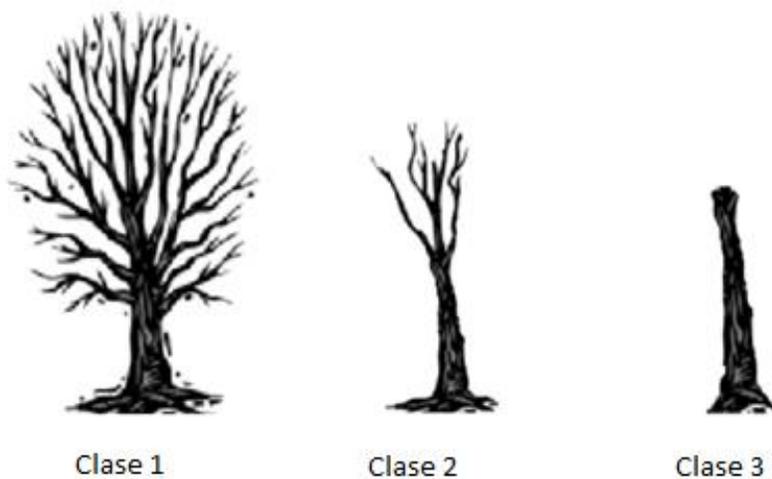
En las parcelas de 80, 400 y 1000 m<sup>2</sup>, siguiendo el mismo procedimiento, se registró la información de los árboles muertos en pie. Estos árboles se clasificaron en tres clases de acuerdo a Walker *et al.* (2009) (Figura 5):

Clase 1. Árboles con ramas y ramitas que se parecen a un árbol vivo (excepto por las hojas). Para confirmar esta información, se hicieron cortes tangenciales a la corteza del árbol hasta ver el xilema. Si no había señales de humedad en esta parte, el árbol se consideró como muerto.

También se usó la información de los colaboradores locales, ya que ellos saben si un árbol con apariencia de muerto, está vivo.

Clase 2. Árboles que van desde los que contienen ramas grandes y pequeñas a los que sólo tienen sólo ramas grandes.

Clase 3. Árboles que tienen únicamente el tronco.



**Figura 5.** Clasificación de árboles muertos en pie. Tomada de Walker *et al.*, 2009.

Se midió el DN de los árboles de las clase 1, 2 y 3, utilizando el mismo criterio para los árboles vivos. También se registró la altura para cada clase de árboles (Figura 6).



Figura 6. Altura de árboles muertos en pie. Modificada de Walker *et al.*, 2009.

### Medición del diámetro normal.

La medición del diámetro se hizo con cintas diamétricas. En el SMIC Hidalgo las formas de vida que se presentaron en los conglomerados son árboles y arbustos. En árboles y arbustos se tomó la medida a 1.30 m de altura de acuerdo a las condiciones de arbolado encontradas e ilustradas en las Figuras 7, 8, y 9.

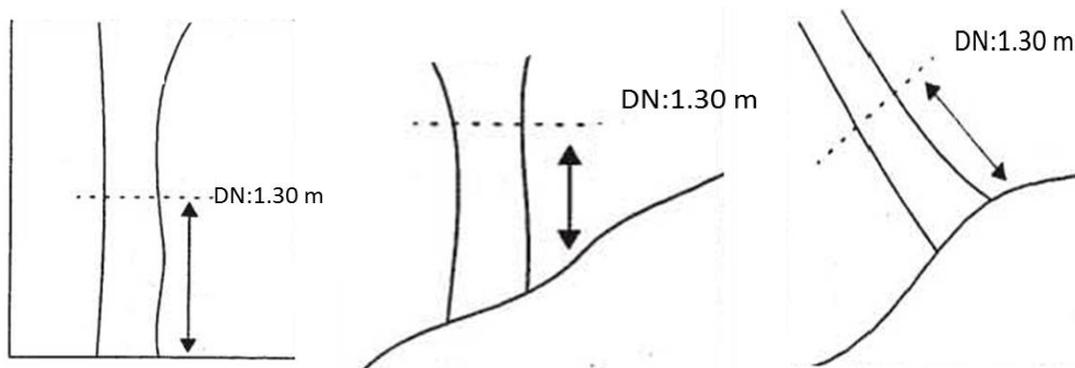
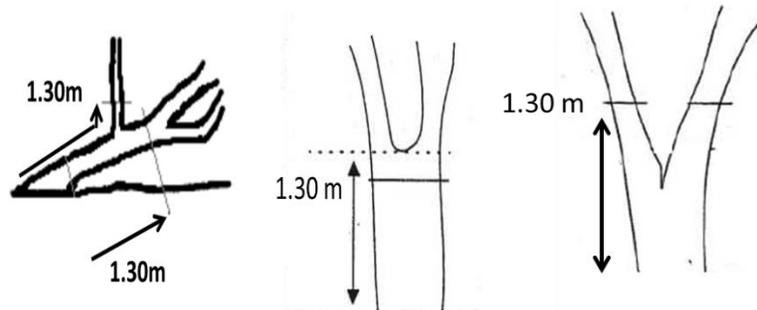
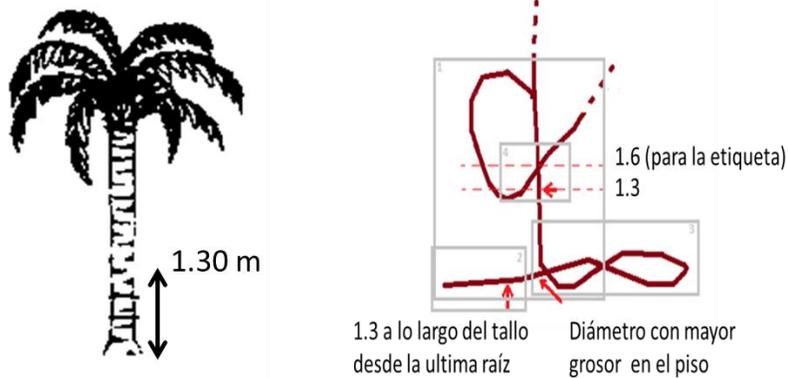


Figura 7. Medición de diámetro normal (DN) en árboles en distintas condiciones topográficas



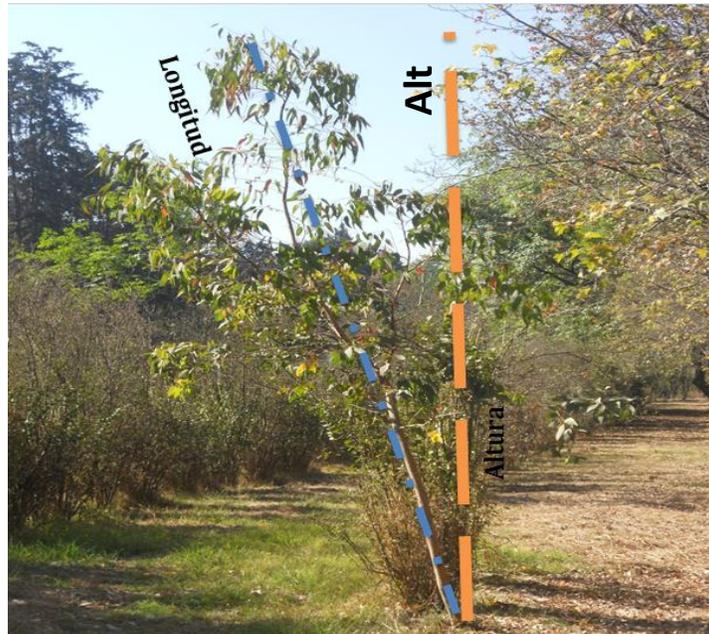
**Figura 8.** Medición de diámetro normal (dn) en árboles con más de un tronco.



**Figura 9.** Medición de diámetro normal (dn) en palmas y lianas

### Medición de la altura total y longitud total de individuos.

La altura se consideró como la distancia de la línea vertical que une la base del árbol y la parte más alta de la copa. En árboles inclinados se midió la longitud del individuo, la cual se consideró como la distancia entre la base y la parte más alta del árbol. En un árbol en posición vertical, la altura y la longitud son iguales (Figura 10).



**Figura 10.** Diferencia entre la altura y la longitud de un árbol.

La medición de la altura en los árboles de hasta 8 m se realizó utilizando un flexómetro de 8 m de longitud, y en árboles mayores a 8 m de altura se midió con un hipsómetro Vertex IV (Figura 11).



**Figura 11.** Medición de la altura con hipsómetro Vertex IV para arboles mayores a 8 m.

La medición de la longitud se realizó para todos los árboles que presentaban una inclinación, dado que en este caso la altura no representa la biomasa contenida en el árbol (Figura 12).



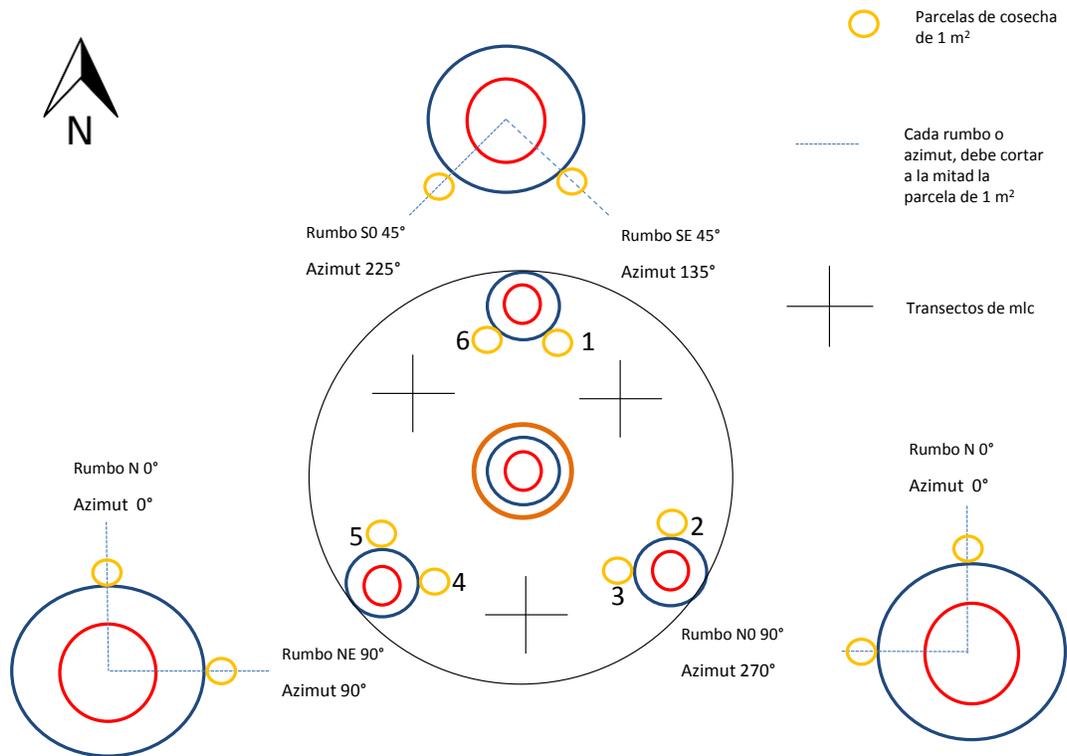
**Figura 12.** Árbol que ejemplifica la medición de la longitud como variable a medir en lugar de la altura.

- **Biomasa menor (diámetro <2.5 cm).**

La biomasa contenida en hierbas arbustos y en individuos de especies arbóreas con  $DN < 2.5$  cm se midió a través del método de cosecha por superficie en subparcelas de  $1 \text{ m}^2$ .

Se establecieron 6 subparcelas circulares de  $1 \text{ m}^2$  por unidad de muestra permanente (dos en cada una de las unidades de muestreo secundarias 2, 3 y 4), lo que dio un total de 240 parcelas en las 40 unidades de muestreo del SMIC-Hidalgo. El centro de las sub parcelas de  $1 \text{ m}^2$  se estableció a una distancia de 12 m a partir del centro del sitio, trazados al azimut correspondiente de cada parcela (Figura 13).

Cada parcela se enumeró de acuerdo a las manecillas del reloj (Figura 13). El centro de cada subparcela de  $1 \text{ m}^2$  se marcó con tubo de PVC, con el fin de realizar re-cosechas en la misma área muestreada y delimitadas con poliducto negro (Figura 14).



**Figura 13.** Ubicación de las parcelas de 1 m<sup>2</sup> por unidad de muestreo permanente en el SMIC-Hidalgo.

- **Procesamiento de muestras en laboratorio**

Se cosechó y trituró en campo, con ayuda de tijeras de podar y serruchos, todas las plantas del sotobosque enraizadas en la superficie del círculo de 1 m<sup>2</sup> (Gómez, 2008) y clasificadas por forma de vida (Walker *et. al.*, 2009) en árboles, arbustos, hierbas, palmas y lianas. Lo anterior facilitó su pesaje y empaquetado de submuestras. Para esta actividad fue importante el apoyo de los brigadistas locales y taxónomos de campo que apoyaron en la identificación de las formas de vida.

Se obtuvo el peso fresco por forma de vida, con ayuda de una báscula con precisión de 0.1 g. Posteriormente se obtuvo una submuestra de aproximadamente 300 g, debidamente etiquetada para su envío a laboratorio. Esta muestra se secó en una estufa de circulación forzada a 70° C (Martínez y Sarukhán, 1993) hasta peso constante. Con los datos de peso fresco

y seco se obtuvo la fracción de peso seco, el cual se utilizó para determinar el peso seco total por forma de vida en la subparcela de 1 m<sup>2</sup>. En el Anexo 3 se muestra el formato de campo-laboratorio que se utilizó para el registro de las variables anteriormente mencionadas.



**Figura 14.** Delimitado de subparcela de 1 m<sup>2</sup> con poliducto negro para la cosecha de biomasa del sotobosque en el SMIC Hidalgo.

- **Re-medición de la biomasa aérea**

En 2014 se implementó una campaña de campo para remedir los 40 conglomerados establecidos en 2013. Se midieron por segunda ocasión todos los árboles marcados en 2013, además se incluyó todos aquellos individuos registrados como incorporados, es decir, aquellos individuos dentro del conglomerado que alcanzaron el límite inferior del diámetro considerado. También, se registraron los árboles que murieron en el periodo. Con estos datos, se calculó el incremento en biomasa aérea en cada conglomerado.

### ***B. Estimación del carbono en la biomasa aérea***

- **Enfoque de estimación del carbono forestal**

La estimación de biomasa y carbono en bosques se basa en datos provenientes de inventarios forestales. Estos están fuertemente ligados a diseños de muestreo definidos antes de realizar el inventario, donde la cantidad de muestra depende del nivel de la variabilidad en el contenido de biomasa y carbono y del nivel de precisión deseado. Lo anterior debe contener un balance entre lo deseado y los recursos económicos disponibles, dado que a mayor precisión el costo también es mayor.

Con inventarios repetidos sobre las mismas unidades de muestreo (en parcelas permanentes) se obtienen altas precisiones en la estimación de las tasas de cambio (crecimiento y mortalidad). Estas estimaciones pueden ser complementadas con unidades de muestreo establecidas en cronosecuencia, donde el tiempo se sustituye por el espacio. De esta forma, con la medición en un solo punto en el tiempo, se pueden tener estimaciones del potencial de acumulación (crecimiento) de biomasa y carbono en un paisaje forestal.

En el SMIC Hidalgo, se está utilizando ambos enfoques para la estimación del almacén de biomasa y carbono y sus tasas de crecimiento e incremento. Las estimaciones de los reservorios de carbono en biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, mantillo y suelo mineral se realizaron a través de estimadores de razón. Para estos componentes se desarrolló un Scrip en el software R para realizar las estimaciones (Anexo 1).

- **Arbolado**

La estimación del almacén total de biomasa viva sobre el suelo en el paisaje de 900 ha del SMIC-Hidalgo fue de 47,215.79 Mg de carbono, con un nivel de incertidumbre del 36% (15,992 Mg C). Es decir, el promedio de existencias de biomasa fue de 52.46 Mg C ha<sup>-1</sup>. Cuadro 3. El incremento total fue de 6,299 ton C año<sup>-1</sup> (± 2, 539) y promedio 7 ton C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 4).

Cuadro 3. Estimación del stock de carbono en biomasa aérea a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

	Estrato	Área ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
<b>Individuos con DN&lt;7.5 cm</b>	Denso	100	64	16	0.73	72.82	30.89
	No Denso	800	32	8	1.08	862.24	68.91
					<b>Subtotal</b>	<b>935.06</b>	
<b>Individuos con 7.5≥DN&lt;20 cm</b>	Denso	100	64	16	18.79	1878.60	26.75
	No Denso	800	32	8	14.49	11593.16	59.06
					<b>Subtotal</b>	<b>13471.76</b>	
<b>Individuos DN≥20 cm</b>	Denso	100	64	16	23.26	2326.23	28.82
	No Denso	800	32	8	36.25	28997.18	50.40
					<b>Subtotal</b>	<b>31323.41</b>	
<b>Sotobosque</b>	Denso	100	64	16	2.91	290.59	29.73
	No Denso	800	32	8	1.49	1194.96	28.86
					<b>Subtotal</b>	<b>1485.55</b>	
<b>Stock total</b>	Denso	100	64	16		4568.24	18.45
	No Denso	800	32	8		42647.54	37.88
<b>TOTAL</b>						<b>47,215.79</b>	<b>36.00</b>

La menor proporción de biomasa aérea se observó en vegetación del sotobosque con solo el 3.4 % respecto al total. Por otro lado, y como era de esperarse, los árboles de dimensiones mayores (DN≥20 cm) contienen más del 66 % del carbono almacenado, seguido por los individuos de 7.5≤ND<20 cm.

Por su parte, la estimación del incremento corriente anual en carbono fue de 6,186.27 Mg C, con un promedio por hectárea de 6.9 Mg C año<sup>-1</sup> (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estimación del incremento en el almacén de carbono en biomasa aérea a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

	Estrato	Área ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
<b>Individuos con DN&lt;7.5 cm</b>							
	Denso	100	64	16	0.30	29.88	47.06
	No Denso	800	32	8	0.26	205.39	63.30
					<b>Subtotal</b>	<b>235.27</b>	
<b>Individuos con 7.5≥DN&lt;20 cm</b>							
	Denso	100	64	16	2.07	206.58	50.87
	No Denso	800	32	8	1.46	1,170.33	104.10
					<b>Subtotal</b>	<b>1,376.91</b>	
<b>Individuos DN≥20 cm</b>							
	Denso	100	64	16	3.91	391.49	101.94
	No Denso	800	32	8	5.23	4,182.60	41.46
					<b>Subtotal</b>	<b>4,574.09</b>	
<b>Stock total</b>							
	Denso	100	64	16		627.96	65.76
	No Denso	800	32	8		5,558.32	38.20
<b>TOTAL</b>						<b>6,186.27</b>	<b>40.99</b>

#### CAPÍTULO IV. Madera muerta

## A. Diseño de muestreo en campo

- Árboles muertos en pie y tocones

En este componente se incluyó a los árboles muertos en pie y tocones registrados en las parcelas de 1000, 400 y 80 m<sup>2</sup> del componente de biomasa aérea.

Se registraron los árboles muertos en pie en las 40 unidades de muestreo permanente. Se midió el DN y la altura y se reportó dentro de la base de datos como categoría 2 (muertos en pié).

Para calcular la biomasa de los árboles muertos en pie de pino se utilizó la ecuación de volumen desarrollada por Soriano-Luna (2014).

$$\text{Vol} = \text{Exp}(-10.4869) * \text{DN}^{1.7525} * \text{H}^{1.3194}$$

Dónde:

Vol = Volumen en m<sup>3</sup>

DN = Diámetro normal en cm

H = Altura en m

Para el volumen de árboles muertos en pie de latifoliadas, se utilizó la ecuación desarrollada por Cruz-Martínez (2007).

$$\text{Vol} = 0.000082 * \text{DN}^{1.7858} * \text{H}^{0.9158}$$

Para convertir el volumen a biomasa, se utilizó la gravedad específica promedio estimada a partir del MLC, categoría 3 de Waddell (2002) para todo el SMIC, que correspondió a 0.35 kg m<sup>-3</sup> para las especies de pino, y de 0.55 kg m<sup>-3</sup> para especies de latifoliadas. Finalmente para obtener el carbono, se utilizó un Factor de Carbono de 0.47 tanto para especies de pino como de latifoliadas.

Por su parte, un tocón se definió como la sección basal del fuste (tronco) de un árbol con altura < 1.3 m. Se registraron todos los tocones en las 40 unidades de muestreo permanente. Se les midió su altura y el diámetro medio. Con estos datos, se calculó su volumen. Dado que se midió el diámetro medio del tocón, se asumió una figura geométrica de cilindro. Se utilizó la misma gravedad específica que para árboles muertos en pie y una fracción de carbono de 0.47.

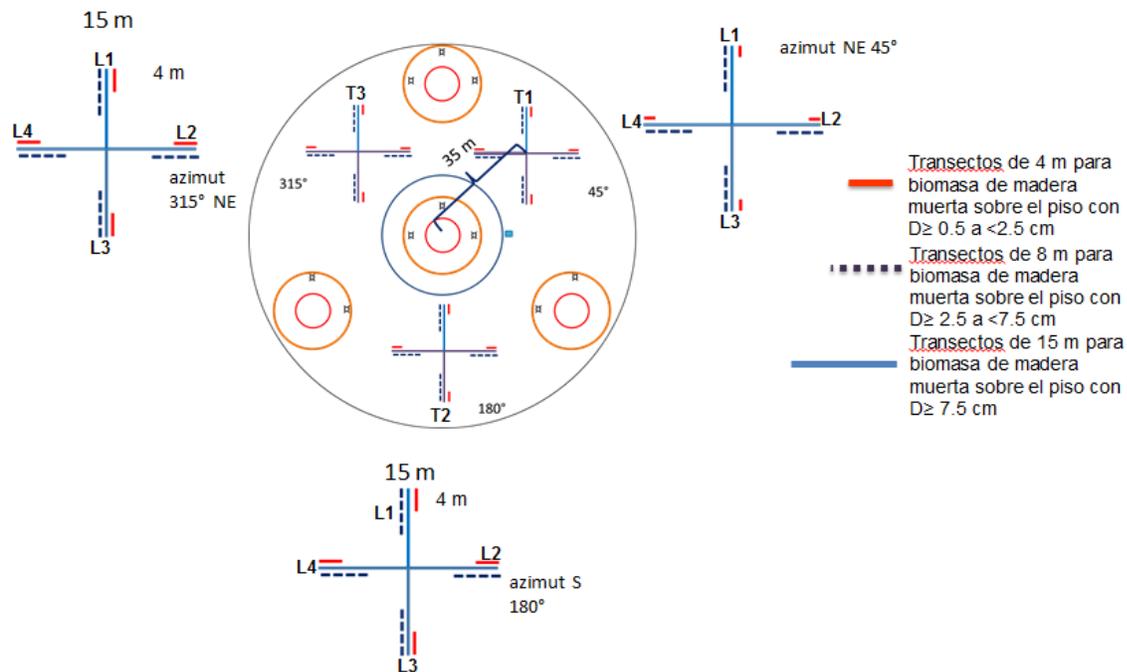
- **Material leñoso caído**

El material leñoso caído (MLC) son las piezas de madera que están sobre el suelo y hasta una altura de 2 metros, desprendidas de su fuente original (Waddell, 2002; Morfín *et. al.*, 2012; INFyS, 2012). El MLC no incluye árboles muertos en pie, tocones, follaje muerto, cortezas separadas (Wadell, 2002). El IPCC (2006) señala que el diámetro del material leñoso caído (MLC) y el mantillo pueden ser definidos en cada país. Para los SMIC, la categorización de los diámetros de las piezas de madera es compatible con trabajos para la caracterización de materiales combustibles y con el INFyS (Cuadro 1) (Brown, 1974; Vera, 1980; Hardy *et. al* 2000; Sikkink y Keane 2008, INFyS, 2012).

En el SMIC-Hidalgo, el MLC se definió como todo aquel trozo de madera que cruza la línea del transecto con diámetro  $\geq 0.5$  cm. El MLC se categorizó de acuerdo a su diámetro (Cuadro 1).

El IPCC (2006), Woldendorp *et. al.* (2004) y Walker *et al.* (2009) recomiendan por unidad de muestreo, al menos 100 metros en líneas de intersección para evaluar MLC gruesos. Por su parte, Brown (1974) considera entre 91 cm a 9 metros para MLC mediano. Vera (1980) utilizó 2 m para MLC fino.

En el SMIC-Hidalgo se establecieron líneas de intersección en forma de “cruz +” a 35 metros al noreste, sur, y noroeste del centro de la unidad de muestreo permanente (Figura 16) (adecuado de Morfín *et.al.* 2012). Cada sección de la “+” tuvo una longitud de 15 m. Se establecieron 120 intersecciones (“+”) en las 40 unidades de muestreo permanente.



**Figura 16.** Ubicación de las intersecciones en forma “cruz +” que definen los transectos para el muestreo de MLC en el SMIC-Hidalgo. (Figura de Juan Pablo Caamal Sosa).

En cada sección de la intersección en forma de “+”, se midieron los diámetros de los troncos categorizados como MLC de acuerdo al Cuadro 1. Por intersección se midieron 60 m para MLC grueso, 32 m para MLC mediano y 16 m para MLC fino (Cuadro1).

**Cuadro 1.** Longitudes en la que se evaluará cada tipo de MLC

Tipo de MLC	Diámetro (cm)	Distancia en metros evaluados en transecto por “+”
-------------	---------------	--

Grueso	$\geq 7.5$ cm	60
Mediano	$2.5 \text{ cm} \leq \text{diámetro} < 7.5 \text{ cm}$	32
Fino	$0.5 \text{ cm} \leq \text{diámetro} < 2.5 \text{ cm}$	16

Cuando las piezas de madera estuvieron desprendidas de su fuente original, es decir, que no estaban pegadas al tallo de un árbol o arbusto en pie, a cada pieza se le registró el diámetro, categoría diamétrica, clase de descomposición, especie y/o grupo de especies (latifoliadas y pinos) cuando no fue posible determinar la especie. Además se registró la pendiente de la línea.

La categoría de descomposición de cada pieza se clasificó mediante el sistema de cinco clases propuesto por Waddell (2002), y se siguió el protocolo del INFyS para materiales combustibles (basado en Brown, 1974) para definir el MLC.

Se colectaron muestras del MLC fino, mediano y grueso para determinar su gravedad específica a partir del peso seco y su volumen. El volumen se estimó por desplazamiento en agua, para lo cual la muestra se cubrió con parafina con el fin de evitar la absorción de esta. Posteriormente, la muestra fue secada a 70 °C hasta peso constante, en una estufa de circulación forzada. El anterior procedimiento fue realizado para cada categoría diamétrica y clase de descomposición. Para determinar el contenido de carbono en el MLC se utilizaron los datos de gravedad específica que se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Gravedad específica por tipo de MLC utilizada para la estimación de biomasa.

Tipo de MLC	Categoría de descomposición	Gravedad específica ( $\text{kg m}^{-3}$ )	
		Latifoliadas	Pinos
Fino		0.56	0.40

Mediano		0.53	0.41
	1	0.60	0.42
	2	0.60	0.42
Grueso	3	0.60	0.42
	4	0.25	0.19
	5	0.25	0.19

A partir del diámetro de cada pieza medida en campo, se estimó el diámetro cuadrático promedio (DCP) y gravedad específica de acuerdo a la clasificación (Latifoliadas, Pino). Finalmente se estimó el contenido de biomasa por transecto a través de la expresión dada por Van Wagner (1982) y citada por Morfín (2012):

Para el MLC grueso:

$$C = \frac{1}{L} * (k) * GE * \sum_{i=1}^n DC * c$$

Donde,

C = Biomasa de MLC (Mg ha<sup>-1</sup>)

k = Constante equivalente a 1.234, derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la carga en Mg ha<sup>-1</sup>

DC = Diámetro cuadrático, que es el diámetro intersectado elevado al cuadrado (Ej. si el diámetro de una pieza intersectada es 10, su diámetro cuadrático es 10<sup>2</sup>=100)

GE = Gravedad específica o densidad específica de la madera calculada sobre peso seco

c = Factor de corrección por la pendiente en una base horizontal

L = Longitud del transecto (m)

Debido a que el terreno no es uniforme, es necesario integrar a la ecuación factores de corrección de la pendiente para cada línea (c) en base a un plano horizontal, y de esta manera tener mejores estimaciones, donde c está dada por:

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

Para el MLC mediano y fino:

La biomasa se obtuvo con la siguiente expresión matemática:

$$C = \frac{1}{L} * (k) * GE * DCP * (f) * c$$

Donde,

C = Carga de piezas de madera (Mg ha<sup>-1</sup>)

k = Constante equivalente a 1.234, derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la carga en Mg ha<sup>-1</sup>.

GE = Gravedad específica que es el volumen seco entre el peso seco de la muestra de MLC en gr/cm<sup>3</sup> (Smith, 1954)

DCP = Diámetro cuadrático promedio (cm), de cada categoría de MLC (mediano y fino)

f= frecuencia de las secciones de madera intersectadas por categoría de MLC (mediano y fino)

c = Factores de corrección de la pendiente en una base horizontal

L = Longitud de los transectos (m)

## B. Estimación del carbono en la madera muerta

- Árboles muertos en pie y tocones

El almacén de carbono contenido en árboles muertos en pie fue de 552.30 Mg C en las 900 ha del SMIC-Hidalgo (Cuadro 5). Mientras que el C almacenado en tocones fue de 118.47 Mg C (Cuadro 6).

Cuadro 5. Estimación del stock de carbono en árboles muertos en pie a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

	Estrato	Área ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
<b>Individuos con DN&lt;7.5 cm</b>	Denso	100	64	16	0.05	5.20	111.4
	No Denso	800	32	8	0.11	88.21	125.3
	<b>Subtotal</b>					<b>93.42</b>	
<b>Individuos con 7.5≥DN&lt;20 cm</b>	Denso	100	64	16	0.15	15.10	144.60
	No Denso	800	32	8	0.21	169.88	124.97
	<b>Subtotal</b>					<b>184.98</b>	
<b>Individuos DN≥20 cm</b>	Denso	100	64	16	0.01	0.53	179.60
	No Denso	800	32	8	0.34	273.37	101.60
	<b>Subtotal</b>					<b>273.90</b>	
<b>TOTAL</b>						<b>552.30</b>	<b>70.49</b>

Cuadro 6. Estimación del stock de carbono en tocones a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

	Estrato	Área ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
--	---------	------------	------------------------	----------------------------	----	---------------	----------------------

<b>Tocones con</b>							
<b>Db&lt;7.5 cm</b>	Denso	100	64	16	0.001	0.055	130.21
	No Denso	800	32	8	0.004	3.385	185.81
					<b>Subtotal</b>	<b>3.440</b>	
<b>Tocones con</b>							
<b>7.5≥Db&lt;20 cm</b>	Denso	100	64	16	0.089	8.929	62.64
	No Denso	800	32	8	0.035	28.042	54.59
					<b>Subtotal</b>	<b>36.971</b>	
<b>Tocones con</b>							
<b>Db≥20 cm</b>	Denso	100	64	16	0.213	21.313	94.39
	No Denso	800	32	8	0.071	56.748	50.97
					<b>Subtotal</b>	<b>78.060</b>	
<b>Stock total tocones</b>						<b>118.47</b>	<b>45.75</b>

- **Material leñoso caído**

Por su parte el MLC fue el que presentó la mayor parte de madera muerta en el sistema con 873.89 Mg C, con un promedio de 0.97 Mg C ha<sup>-1</sup> (Cuadro 7).

El total de madera muerta estimada en el SMIC-Hidalgo fue de 1,544.66 Mg C en las 900 ha (Cuadro 8), con un promedio de 1.73 Mg C ha<sup>-1</sup>. Esta cantidad representó solo el 3.3 % de la biomasa viva. Este hallazgo refleja el carácter manejado del bosque, ya que por una parte, las secuelas de aclareo programadas “se adelantan” a la mortalidad natural del arbolado; mientras que los productores extraen la mayor cantidad de productos leñosos destinados a diferentes productos (carbón, leña, etc.).

Cuadro 7. Estimación del stock de carbono en material leñoso caído a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

Categoría de tamaño	Estrato	Área ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
<b>Fino</b>	Denso	100	64	16	0.539	53.921	23.2
	No Denso	800	32	8	0.463	370.385	28.9
					<b>Subtotal</b>	<b>424.305</b>	

<b>Mediano</b>	Denso	100	64	16	0.520	51.955	28.0
	No Denso	800	32	8	0.368	294.540	48.9
						<b>Subtotal</b>	<b>346.495</b>
<b>Grueso</b>	Denso	100	64	16	0.131	13.101	23.25
	No Denso	800	32	8	0.112	89.990	28.86
						<b>Subtotal</b>	<b>103.090</b>
<b>Stock en MLC</b>						<b>873.89</b>	<b>31.88</b>

Cuadro 8. Estimación del stock de carbono en madera muerta en el SMIC-Hidalgo.

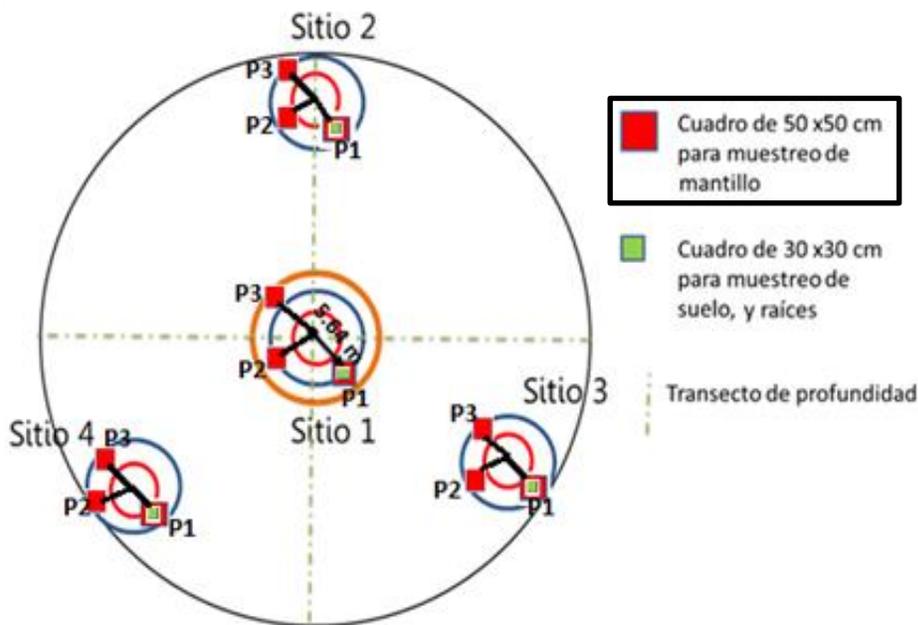
Estrato	Área Ha	Número de Sitios	Número de Conglomerados	ER	Stock (Mg)	Incertidumbre (%)
Denso	100	64	16	1.70	170.10	25.31
No Denso	800	32	8	1.72	1,374.56	33.52
<b>TOTAL</b>					<b>1,544.66</b>	<b>29.96</b>

## CAPÍTULO V. Componentes subterráneos

### A. Diseño de muestreo en campo

- Mantillo

Las muestras de las capas orgánicas del suelo (mantillo y capa de fermentación) se tomaron en las 40 unidades de muestreo permanentes del SMIC-Hidalgo. Se determinaron 12 puntos de muestreo (3 por sitio) ubicados a 5 m del centro de cada una de la unidades de muestreo secundarias, en azimut 135° (punto 1), 225° (punto 2) y 315° (punto 3) (Figura 17).



**Figura 17.** Localización de los puntos de muestreo del mantillo en el SMIC-Hidalgo.

***Muestreo de las capas orgánicas del suelo (mantillo y capa de fermentación).***

Se utilizó el siguiente procedimiento el muestreo de mantillo (dividido en dos capas).

1. Ubicar el punto de muestreo.
2. Sobre el piso forestal colocar un marco de madera o metal de 50 x 50 cm, cuyo centro sea el punto a 5 m de distancia del centro. Con ayuda de un cuchillo cortar el borde del marco para separar el material que se encuentra fuera de esta área.

3. Identificar la primera capa: mantillo (materia orgánica recién caída en donde se identifican claramente los componentes) y medir la profundidad dividiendo el cuadro de 50 x 50 cm en cuatro cuadrantes, y midiendo la profundidad de la capa en el centro de cada cuadrante.
4. Colectar la muestra de la primera capa en una bolsa de papel con su respectiva etiqueta. Si la muestra es muy grande se puede tomar una submuestra para llevar al laboratorio. Para ello se requiere tomar el peso fresco de toda la muestra, registrarlo, homogeneizarla sobre una lona, cuartear hasta obtener una submuestra representativa y con la cantidad suficiente. Registrar el peso húmedo de la submuestra y llevarla al laboratorio, dejando en el sitio el resto de la muestra.
5. Repetir los pasos anteriores para las otra capa orgánica del suelo (Capa F y H). Esa es una capa donde la materia orgánica está descompuesta a grado tal que ya no es posible reconocer estructuras completa (hojas, ramillas) (Burton y Pregitzer, 2008):
6. Las muestras deben ser puestas a secar inmediatamente. Una vez que se llegue al campamento colocarlas en la estufa rústica y secar hasta que se pueda llevar al laboratorio para su procesamiento.

#### ***Procesamiento de muestras en laboratorio***

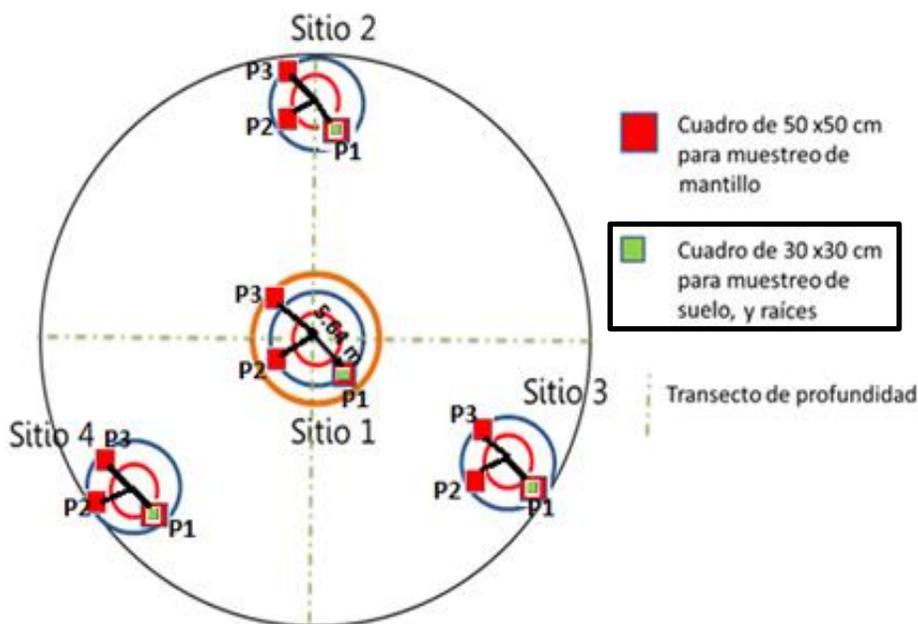
Lasas muestras de las capas orgánicas se colocaron en bolsas de papel, y se secaron en una estufa de circulación forzada 70 °C hasta peso constante, y se registró el peso seco de la muestra. Con el peso húmedo de la submuestra y su peso seco, se obtuvo la fracción de peso seco que se utilizó para obtener la biomasa de toda la muestra por capa de mantillo.

Posteriormente, las muestras se molieron, se homogeneizaron y se obtuvo una submuestra representativa de aproximadamente 10 g. Estas se tamizaron en número 40 y se mandaron al laboratorio para determinar su concentración de carbono. Con la concentración de carbono se determinó el contenido de carbono de la muestra.

- **Materia orgánica del suelo**

Las muestras de suelo se tomaron en las 40 unidades de muestreo permanentes del SMIC-Hidalgo. El muestreo de suelos se realizó en cuatro puntos por unidad de muestreo primaria (uno por sitio) (Figura 18) ubicados en el azimut 135°, a 5 m del centro de la unidad de muestreo secundaria. En las unidad de muestreo secundaria 1, en los sitios 2, 3 y 4 el muestreo de suelo se realizó en una sola profundidad (30 cm) y en los sitios 1 el muestreo fue de 10 en 10 cm de profundidad hasta los 50 cm y a partir de los 50 cm se realizó hasta 1 m de profundidad (Figura 15). En la unidad de muestreo secundaria identificada con el número 1 (Sitio 1), el muestreo del suelo se realizó en intervalos de 10 cm hasta 50 cm de profundidad; y de una sola muestra de 50 a 100 cm de profundidad. En las unidades secundarias 2, 3 y 4 (sitios 2, 3 y 4), el suelo se tomó en una sola muestra hasta una profundidad de 30 cm

Además de tomar las muestras antes mencionadas, se estableció un transecto a lo largo de la unidad de muestreo primaria en dirección norte-sur, y este-oeste en el cual se registró la profundidad del suelo cada 5 m. Lo anterior se realizó para tener mayor detalle de la distribución de la profundidad del suelo en la unidad de muestreo primaria.



**Figura 18.** Localización de los puntos de muestreo de suelo, y transectos de profundidad en el SMIC-Hidalgo.

En el sitio 1, las muestras se toman a intervalos de 10 cm en los primeros 50 cm y de 50 cm hasta excavar 1 m de profundidad, si las condiciones del terreno lo permitieron. Para los sitio 2,3 y 4 solo se tomó en una sola profundidad de 30 cm. El marco utilizado fue de 30 x 30 cm. El procedimiento fue el siguiente:

1. Asegurar el marco de 30 x 30 cm con estacas o clavos para evitar que éste se mueva. Con ayuda de una pala plana, una de jardinero y cucharas de albañil, remover el suelo dentro del cuadro; cuando se acerque a cada profundidad tener cuidado y medir constantemente para no pasarse de esa profundidad. Debido a que la profundidad es variable, es necesario anotar la profundidad en cuatro puntos: en el centro de los cuatro cuadrantes del cuadro.

Es importante tratar de igualar las paredes del hueco; si hay un alto contenido de piedras, procurar que al removerlas no se dejen huecos que sobrepasen los límites del cubo. Si hay una piedra muy grande de la cual solo una parte se encuentra dentro del hueco, sustituirla por una de dimensiones parecidas a modo de considerar su volumen y/o peso.

2. En el centro del cuadro se debe medir la profundidad total del suelo con ayuda de una varilla.

3. Sobre una lona tamizar el material extraído del hueco, con un tamiz de 12 mm de malla; el material que quede en el tamiz separarlo por componente (ej. piedras, raíces y otros residuos orgánicos). Las raíces y residuos orgánicos se llevan al laboratorio, mientras que las piedras se pesarán y/o se llevará una submuestra, según sea el método a seguir para la determinación de la densidad aparente del suelo.

4. El material que pasó el tamiz de 12 mm se pesa con ayuda de costales y bascula de capacidad de 500 kg (precisión 100 g).

5. Sobre la lona, vaciar la muestra del material < 12 mm y homogeneizarla. Dividir la muestra en cuartos y tomar uno de ellos, homogeneizar y volver a cuartear; hacer este proceso repetidamente hasta que se tenga una muestra representativa más pequeña pero suficiente para los análisis de laboratorio (aproximadamente 500 g). Registrar el peso fresco de la submuestra de suelo y colocarla en una bolsa de plástico con su respectiva etiqueta para su envío a laboratorio.

### ***Densidad aparente del suelo***

Para estimar la densidad aparente fue necesario tener el peso seco del suelo (g) y el volumen ( $\text{cm}^3$ ). El primero se obtuvo en el laboratorio después de secar el suelo; mientras que para el volumen se determinó de la siguiente manera:

Una vez que se ha vaciado el hueco excavado, se cubrió con una bolsa de plástico flexible; se llenó el hueco con agrolita, midiendo el volumen requerido con un vaso de precipitado (en mililitros).

### **Procesamiento de muestras en laboratorio**

#### ***Suelo***

En el laboratorio, se tamizaron las submuestras de suelo (500g) con una malla número 10 (2 mm) deshaciendo los agregados para separar el suelo mineral de las piedras, raíces finas y otros restos orgánicos. Se tomó una pequeña submuestra del suelo tamizado (10 g) y se puso a secar en cajas petri en una estufa de circulación forzada a 105 °C hasta peso constante. Se tomó otra submuestra de aproximadamente 250 g y se colocó en una bolsa de plástico tipo sellada, identificada con la muestra y se envió al laboratorio para la determinación de la concentración carbono.

### ***Estimación del volumen de las piedras***

Para estimar el volumen de las piedras, es necesario dividir la masa total de las piedras entre la densidad de las mismas. Para obtener la densidad se requiere del peso seco de la submuestra de piedras y dividirlo entre el volumen. La muestra de piedras tomada en campo se transportó al laboratorio, se secó a temperatura ambiente y con la ayuda de brochas se le desprendió las partículas de suelo adheridas a su superficie. Posteriormente se registró su peso. El volumen de las piedras se determinó por el método de desplazamiento de agua.

### ***Estimación del volumen de las raíces***

Para estimar el volumen de las raíces se sigue el mismo procedimiento de la “estimación del volumen de las piedras”. Con la diferencia que el volumen se determinó cubriendo la raíz con parafina para impedir la absorción de agua. Posteriormente el peso seco de las raíces se determinó después de que fueron secadas en una estufa de circulación forzada a 70 °C hasta peso constante. Para el caso de los otros residuos orgánicos, se asume que la densidad es similar a la de las raíces.

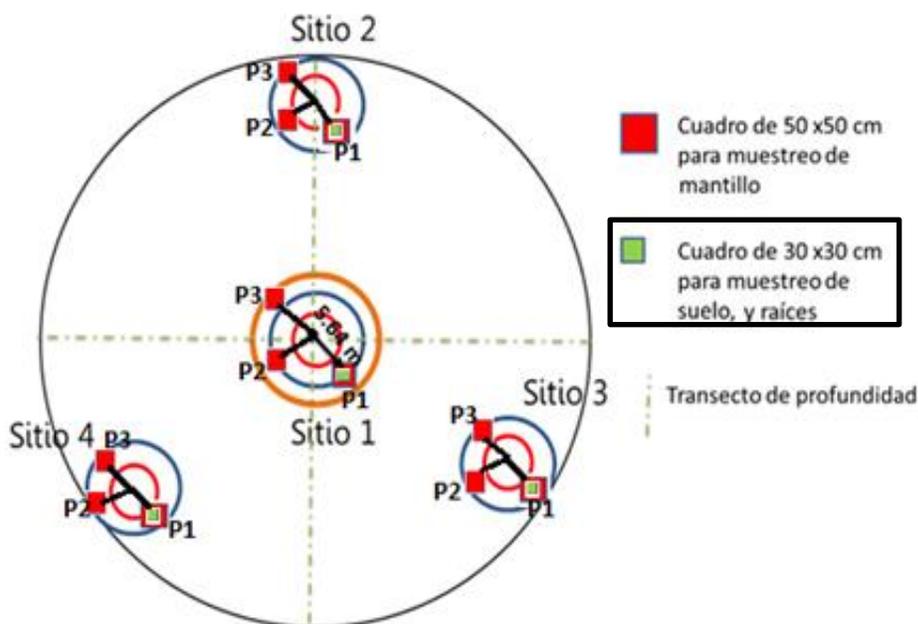
### ***Estimación del volumen del suelo***

Para estimar el volumen de la fracción fina del suelo (< 2mm), al volumen total del hueco se le restó el volumen de las piedras, el de las raíces gruesas y el de los otros restos orgánicos. Finalmente, para estimar la densidad aparente de la fracción fina del suelo se dividió la masa (g) de la fracción fina (< 2mm) entre el volumen de la misma fracción (cm<sup>3</sup>).

- **Biomasa subterránea: raíces**

La biomasa de raíces se estimó a través del método de excavación (pit method) en las 40 unidades de muestreo permanente donde se realizó el muestro de suelos. Se excavaron 4

perfiles por unidad de muestra permanente (uno por unidad secundaria de muestreo). El punto de muestreo se ubicó a 5 m del centro de la unidad secundaria de muestreo con azimuth de 135°. En la unidad de muestreo secundaria identificada con el número 1 (Sitio 1), la colecta de raíces se realizó en intervalos de 10 cm hasta 50 cm de profundidad; y de una sola muestra de 50 a 100 cm de profundidad. En las unidades secundarias 2, 3 y 4 (sitios 2, 3 y 4), las raíces se tomaron en una muestra hasta una profundidad de 30 cm (Figura 15).



**Figura 15.** Localización de los puntos de muestreo de biomasa subterránea en el SMIC-Hidalgo (cuadros verdes).

Las muestras de raíces fueron llevadas al laboratorio. Se separaron en tres clases de tamaño: <2mm, 2 – 5 mm y >5 mm. Para este componente se obtuvieron varios tipos de muestras de raíces: las que se no pasan el tamiz de 12 mm (en campo), las que no pasan el tamiz de 2 mm (en laboratorio) y las que pasen el tamiz de 2 mm.

*Raíces > 12 mm*

Las raíces que no pasaron el tamiz de 12 mm, se enjuagaron con agua destilada para eliminar el suelo mineral y los restos orgánicos. Se secó el excedente de agua y se estimó el volumen por el método de desplazamiento de agua. Posteriormente se determinó la densidad de las raíces dividiendo el peso entre el volumen.

Posteriormente se secaron en una estufa de circulación formada a 70 °C hasta peso constante.

#### *Raíces > 2 mm*

Las raíces que no pasaron el tamiz de 2 mm, se enjuagaron con agua destilada para eliminar el suelo mineral y los restos orgánicos. Posteriormente se secaron en una estufa de circulación formada a 70 °C hasta peso constante.

#### *Raíces < 2 mm*

En las submuestras del suelo que pasó por el tamiz de 2 mm, se separaron las raíces manualmente con pinzas de disección, para estimar la biomasa de raíces en la muestra total. Se enjuagaron con agua destilada y se secaron en una estufa de circulación forzada a 70 °C.

#### *Otros residuos orgánicos*

Se juntaron los residuos orgánicos obtenidos en los distintos tamices, y se llevaron a peso seco en una estufa de circulación forzada a 70 °C.

## **B. Estimación del carbono en los componentes subterráneos**

- **Mantillo.**

A través de estimadores de razón se estimó el stock de carbono en el mantillo de las capas Hojarasca (Ho) y fermentación (F). Así el Stock en el mantillo fue de 34,372.87 Mg C, con un promedio de 38 Mg C ha<sup>-1</sup>. El nivel de incertidumbre fue del 13% (Cuadro 9).

Se pudo observar que después de la corta de regeneración el contenido de Carbono en el mantillo en ambas capas (Ho + F) aumenta, para posteriormente bajar por el proceso de descomposición (Figura 19).

Cuadro 9. Estimación del stock de carbono en el mantillo a través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

Estrato	Área (ha)	ER	Stock (Mg)	Stock total (Mg)	Stock promedio (Mg)	Incertidumbre total (%)
1 Denso	100	37.28	3,728.18	34,372.87	38.19	13.48
2 No Denso	800	38.31	30,644.69			

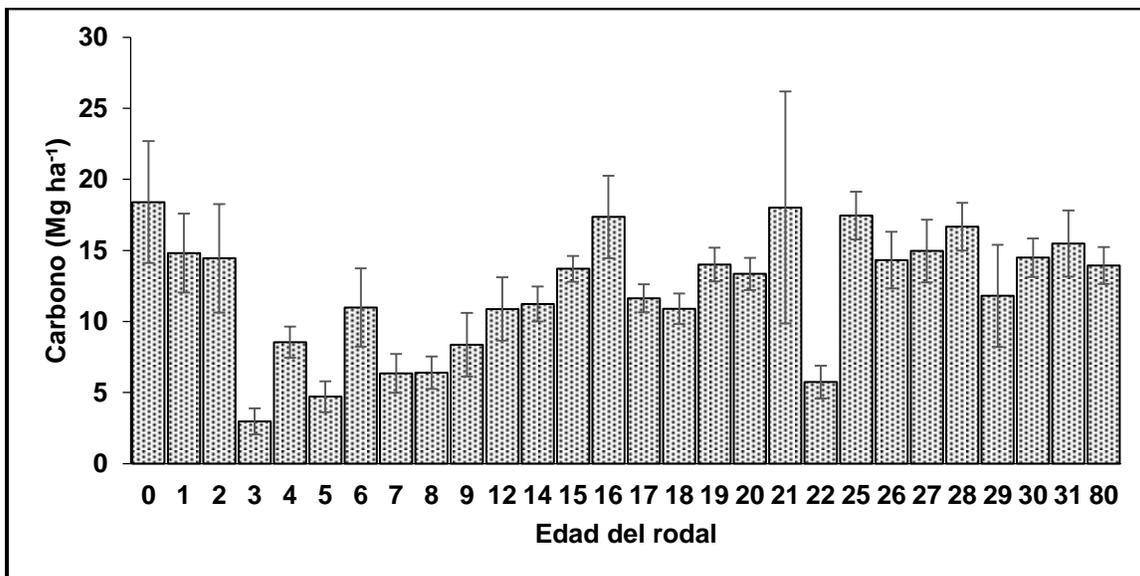


Figura 19. Contenido de carbono en el mantillo en la capa de Hojarasca (Ho) y Fermentación (F) en el SMIC-Hidalgo. Las barras verticales representan el error estándar. El rodal de 80 años corresponde a un bosque que no ha sido cosechado.

La cantidad de mantillo llega a un mínimo entre 3 a 5 años después de la corta de regeneración (asumida aquí como la edad del rodal), para después aumentar hasta alcanzar una estabilización a partir de los 15 años de edad del rodal. De la edad de cada rodal depende el contenido tanto de biomasa como de carbono. Si la edad del rodal es mayor es claro que habrá una alta densidad de arbolado lo provoca el cierre del dosel, lo que a su vez ocasiona que la luz del sol no pueda penetrar fácilmente hasta el piso forestal y el nivel de descomposición de la materia orgánica sea lento. En caso contrario donde los rodales presentan edades menores, el nivel de descomposición es más rápido debido a la exposición hacia el sol y los organismos descomponedores agilizarán el proceso y el contenido de material será menor.

- **Suelo.**

El mayor almacén de carbono se encontró en el suelo mineral (178,162.87 Mg C) con un nivel de incertidumbre del 20.3 %. El promedio de contenido de carbono fue de 197.96 Mg C ha<sup>-1</sup> (Cuadro 10). El carbono en el suelo fue más de 3 veces mayor que el observado en la biomasa aérea viva y muerta.

Cuadro 10. Estimación del stock de carbono en el suelo mineral (COS) través de estimadores de razón, en el SMIC-Hidalgo.

	C por estrato (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Área	Incertidumbre	Stock COS (Mg)	COS promedio (Mg ha <sup>-1</sup> )
<b>SMIC Hidalgo</b>					
Estrato Denso	200.99	100.00	6.99	20098.95	
Estrato No Denso	197.58	800.00	22.86	158063.92	
<b>Stock SMIC</b>				<b>178,162.87</b>	<b>197.96</b>
<b>Incertidumbre (%)</b>				<b>20.30</b>	

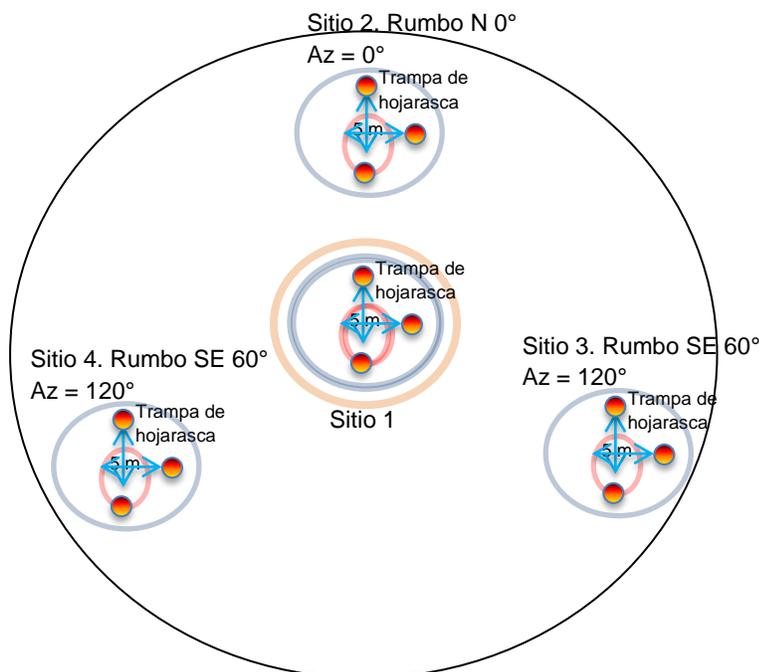
COS. Carbono orgánico en el suelo mineral.

## CAPÍTULO VI. Flujos del carbono forestal

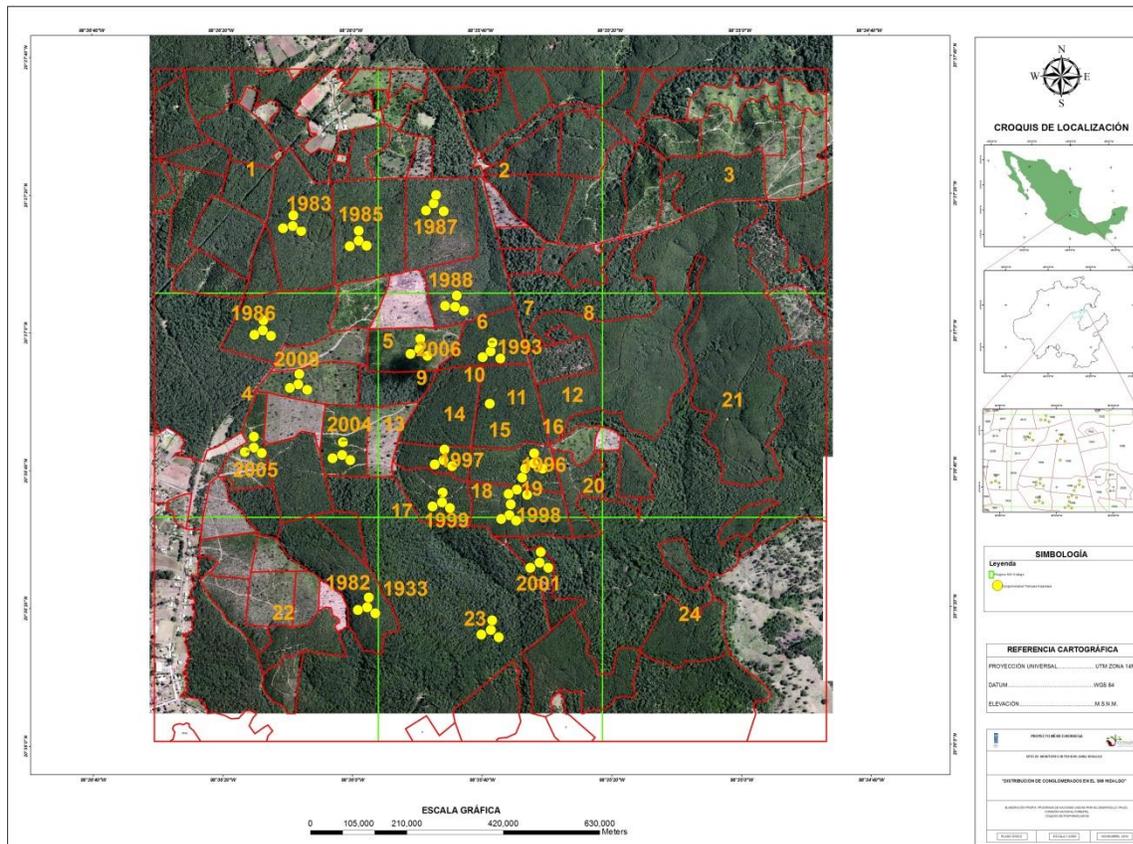
### A. Producción de hojarasca

- **Diseño de muestreo en campo**

Para evaluar la producción de hojarasca e establecieron 216 trampas en 18 unidades permanentes de muestreo primarias dispuestas en cronosecuencia en el SMIC Hidalgo. Se utilizaron tres trampas por unidad secundaria de muestro (sitio) (12 trampas por conglomerado) (Figura 20). En la Figura 21 se presenta la distribución de unidades de muestreo primarias donde se establecieron las trampas de hojarasca con su respectiva edad, esto permitirá cuantificar la producción de hojarasca por edad del bosque. Las trampas se ubicaron a 5 metros al norte, al este y al sur a partir del centro del sitio. Las trampas están diseñadas de acuerdo a la metodología recomendada por Berg y Laskowski (2005).



**Figura 20.** Diseño de las parcelas para el establecimiento de las trampas de hojarasca en el SMIC-Hidalgo.



**Figura 21.** Unidades de muestreo primarias donde se establecieron las trampas de hojarasca en el SMIC Hidalgo.

Las trampas son de forma circular, de un diámetro de 80 cm y área de captación 0.5 m<sup>2</sup> (superficie de colecta). Se construyeron con aros de poliducto flexible de media pulgada. La tela utilizada fue Tul 15 de trama mediana y de gran flexibilidad, lo que permitió el paso de luz aire y buen drenaje. La trampa se colocó con tubos de PVC de ½" a 0.75 m sobre el suelo (Figura 22).

La colecta del material de las trampas se realizó mensualmente (durante un año). Los componentes de hojarasca se separaron por sus estructuras en: acículas de pino, hojas de latifoliadas, ramillas (diámetro menor a 0.5 cm), estructuras reproductivas, epífitas, resto de animales y fragmentos sin identificar (Gutiérrez-Vázquez, *et. al.*, 2012; Hoover, 2008); con estos datos se calculó la tasa de caída por cada componente (g/m<sup>2</sup>/mes<sup>-1</sup>).



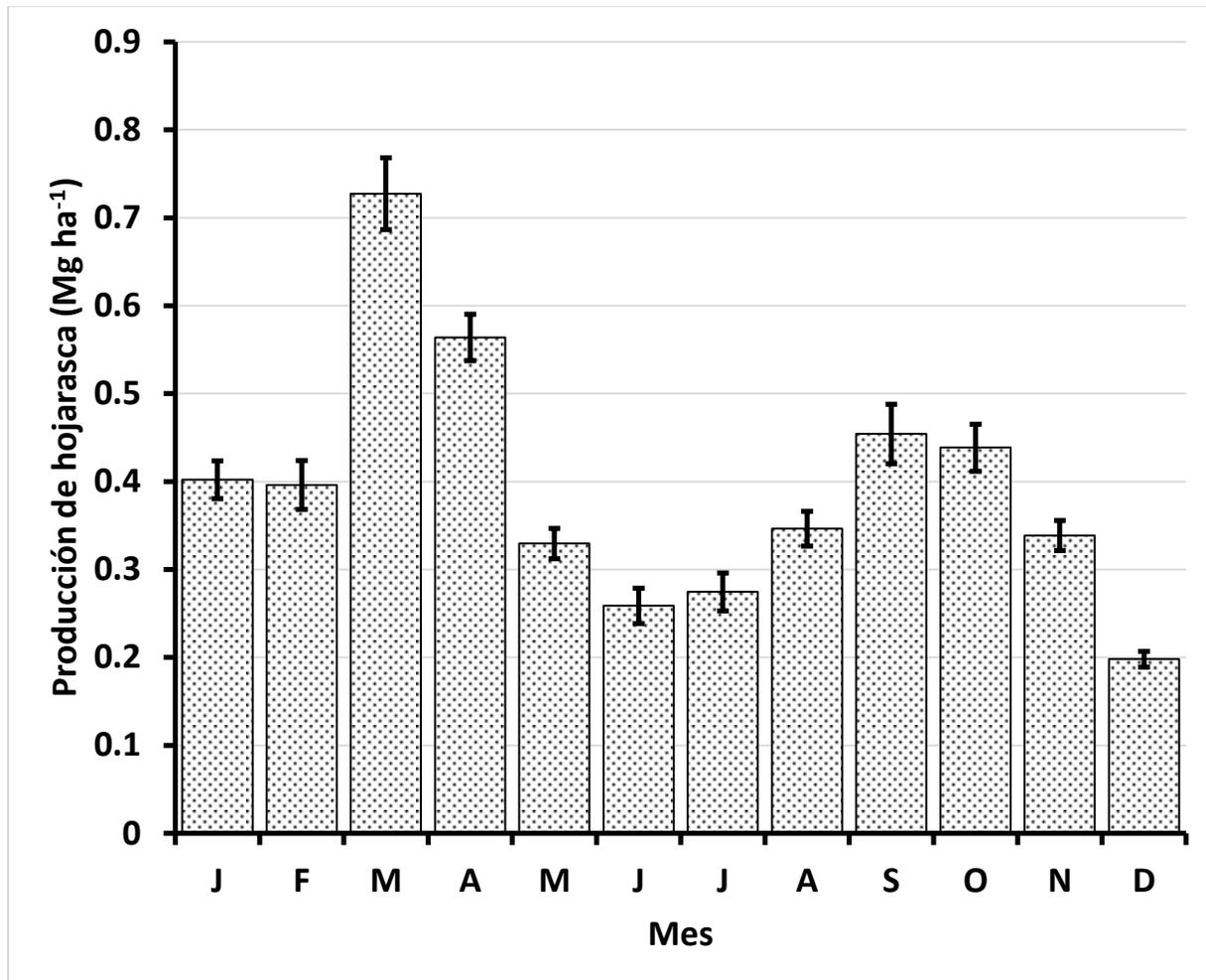
**Figura 22.** Construcción de trampas de hojarasca en el SMIC-Hidalgo.

Se llevó todo el material colectado de cada trampa a laboratorio, previamente identificado para ser secado a 70° C para obtener peso seco constante (Martínez y Sarukhan, 1993). Se registró el peso seco y número de trampa de acuerdo al formato del Anexo 7. A todos los componentes se les determina el peso seco. Posteriormente se molieron y se enviaron a laboratorio para determinar la concentración de carbono.

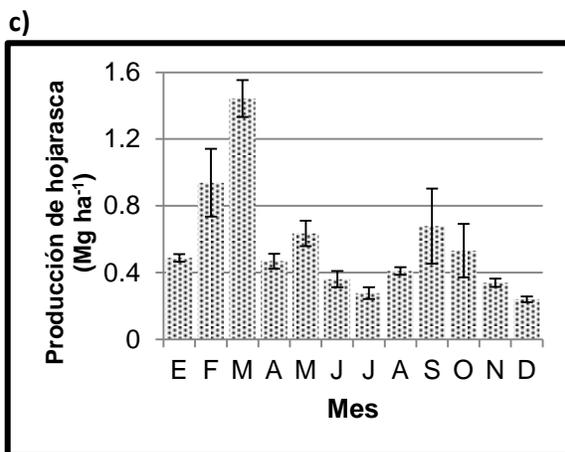
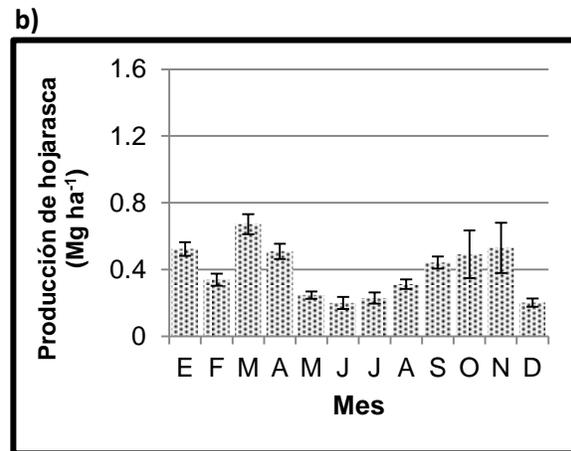
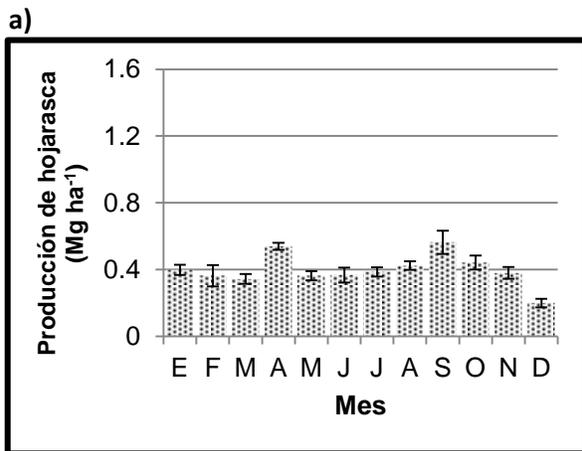
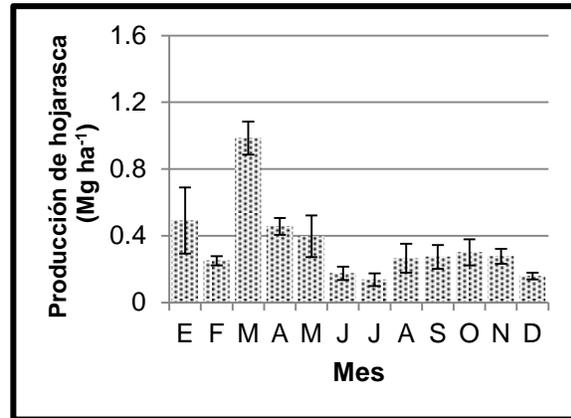
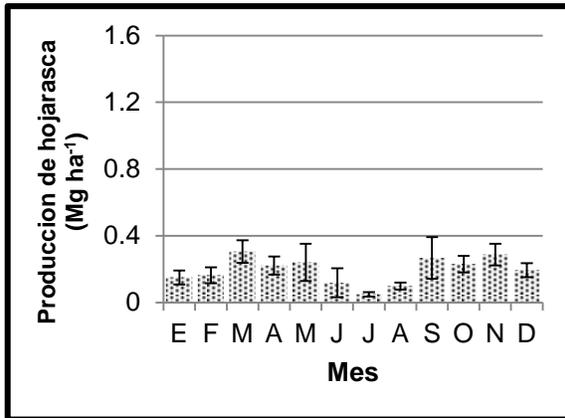
- **Estimación de la transferencia de carbono vía la hojarasca**

Los resultados reportan una producción promedio de 4.7 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; con una alta variabilidad estacional en la producción de hojarasca (Figura 23). La producción de hojarasca presentó dos máximos. El primero se presentó en marzo y abril, mientras que el segundo en septiembre y octubre. El mes con la mínima producción de hojarasca fue diciembre.

Por otro lado, al analizar la producción de hojarasca en rodales de diferente edad, se observó un patrón de aumento en la cantidad de hojarasca producida a medida que aumentó la edad (Figura 24). La mayor producción de hojarasca se observó en el bosque de referencia.



**Figura 23.** Producción de hojarasca en el SMIC-Atopixco. Las barras verticales representan el error estándar



e)  
**Figura 24.** Producción de hojarasca: a) 6 años, b) 15 años, c) 26 años, d) 32 años, y e) Bosque de referencia en el SMIC-Hidalgo. Las barras verticales indican el error estándar.

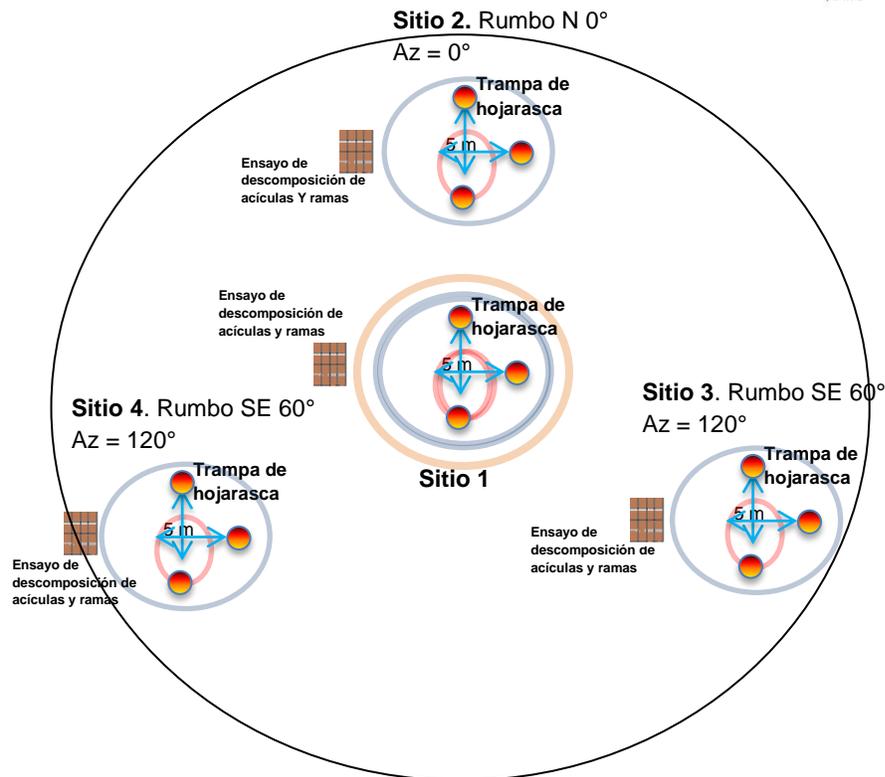
**B. Descomposición del material foliar**

- **Diseño de muestreo en campo**

El método utilizado para la descomposición es el de bolsas de mallas para cuantificar la pérdida de masa a través del tiempo, aunque se considera como un método indirecto para estimar la descomposición (Martínez, 2014).

Antes de establecer los ensayos de descomposición de acículas de pino, éstas se colectaron previamente de los conglomerados donde se establecieron los lotes de descomposición. Las acículas se obtuvieron de la capa más superficial del piso forestal como lo recomienda Hirobe *et al.* (2004). También se obtuvieron a través de mover los árboles que presentaran acículas senescentes. Las acículas se colectaron en los meses de diciembre, enero y febrero. Las acículas recolectadas se llevaron a laboratorio y se secaron a temperatura ambiente en un cuarto seco durante 6 semanas para homogeneizar su estado antes de ser evaluadas en campo. Posteriormente se pesaron muestras de 10 g de acículas de *Pinus patula* en una balanza de precisión y se introdujeron en bolsas plásticas de malla de polietileno tipo mosquitero color negro de 30 x 30 cm con una luz de 2 mm.

Se establecieron los lotes para descomposición de acículas de pino en los mismos conglomerados donde se establecieron las trampas de hojarasca, por tanto en las mismas anualidades (edades del bosque). Los lotes se ubicaron a 12.56 m al oeste de cada sitio como se muestra en la Figura 29. Cada lote contenía 15 bolsas. Además se secaron muestras de bolsas de acículas de las diferentes edades en una estufa a 70 °C hasta obtener el peso constante, con el objetivo de tener una relación del peso inicial, que sirvió para evaluar la variación de la pérdida de masa después de la colecta de las bolsas.



**Figura 29.** Diseño y ubicación de los lotes en la unidad permanente de muestreo para evaluar la descomposición de hojas y ramas.

Las bolsas se colectaron del campo mensualmente en los primeros 6 meses, 6 bolsas, posteriormente cada 2 meses hasta completar la colecta de 1 año, a partir del inicio del experimento (Figura 30). De las bolsas colectadas, se extraen las acículas y se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas para su correcta identificación (Anexo 8) y posteriormente se llevaron al laboratorio en donde se secaron a 70 °C hasta obtener el peso constante (Robertson-*et al.*, 1999).

Posteriormente, las acículas se molieron para ser enviadas al laboratorio para determinar la concentración de carbono. Con estos datos se determinó el flujo de carbono a través del tiempo durante el proceso de descomposición (Robertson *et al.*, 1999).



**Figura 30.** Lote para evaluar la descomposición de acículas en campo del SMIC Hidalgo.

- **Estimación de la tasa de descomposición de las hojas**

Con los pesos computados en el laboratorio se evaluó la pérdida de masa a partir del peso inicial y se estimaron de manera indirecta las tasas anuales de descomposición ( $k$ ) mediante el modelo propuesto por Jenny *et al.* (1949) y retomado por Olson (1963), un modelo de decaimiento exponencial simple negativo cuya fórmula es:

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

Dónde:

$X_t$  = peso seco de las acículas en un tiempo dado.

$X_0$  = peso seco de las acículas al inicio del experimento.

$t$  = tiempo transcurrido (días)

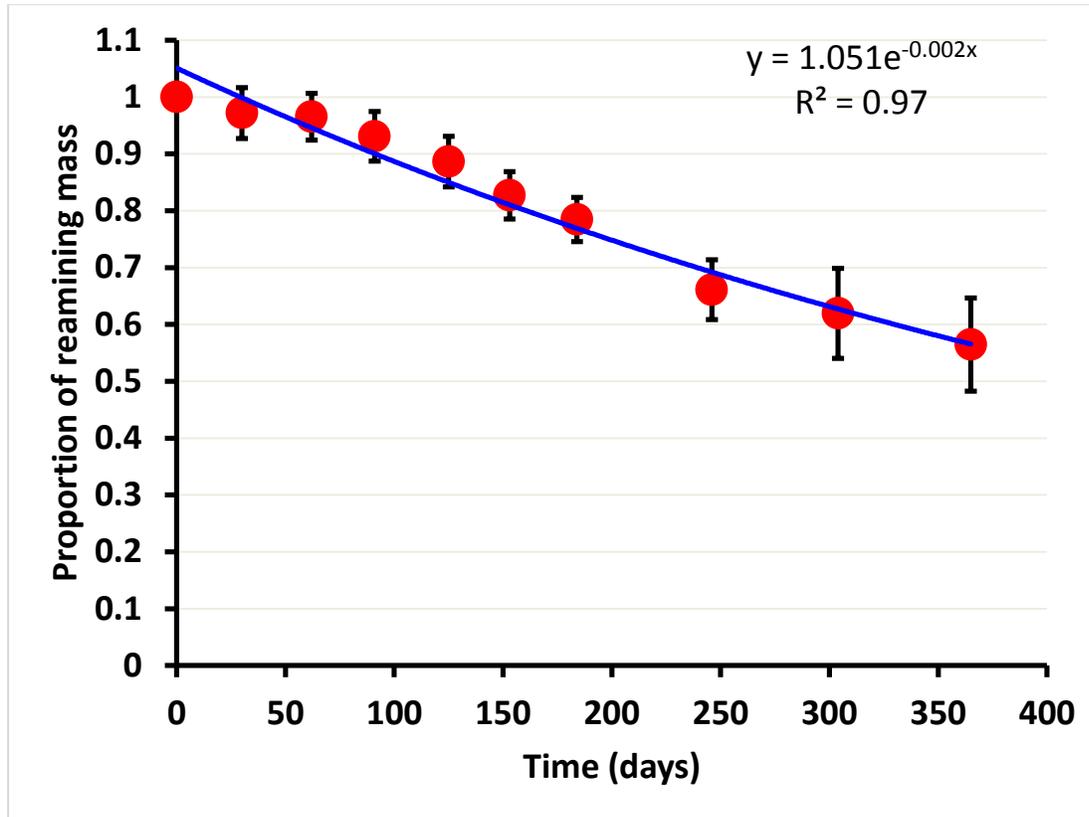
Así mismo se proyectaron los tiempos necesarios para la descomposición del 50 y el 99 % de las acículas en cada rodal, a partir de las formulas propuestas por el mismo autor, mediante el uso de constantes obtenidas en un bosque en estado estacionario teórico y las tasas de descomposición anuales ( $k$ ). Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$t_{50\%} = 0.6931/k$$

$$t_{99\%} = 5/k$$

En la Figura 31, se presenta el promedio de la pérdida de masa de las acículas. Después de un año, el porcentaje de masa remanente fue de 56% respecto a la masa inicial.

Cuando se analizan por edad del rodal, se observan diferencias en las tasas de descomposición calculadas mediante la fórmula de Olson (1963). La más alta se presentó en el rodal cosechado en 2008 ( $k= 0.56$ ), mientras que la más baja se encontró en el rodal de 1988 ( $k= 0.37$ ). Por otra parte el tiempo de semidescomposición (en años) más bajo se calculó para el rodal de 2008 ( $t_{50\%} = 1.33$ ), rodal en el que también se estima el menor tiempo necesario para que se descomponga el 99% de la hojarasca ( $t_{99\%} = 9.57$ ) (Cuadro 11).



**Figura 31.** Descomposición de hojas de pino en el SMIC-Atopixco. Las barras verticales representan el error estándar

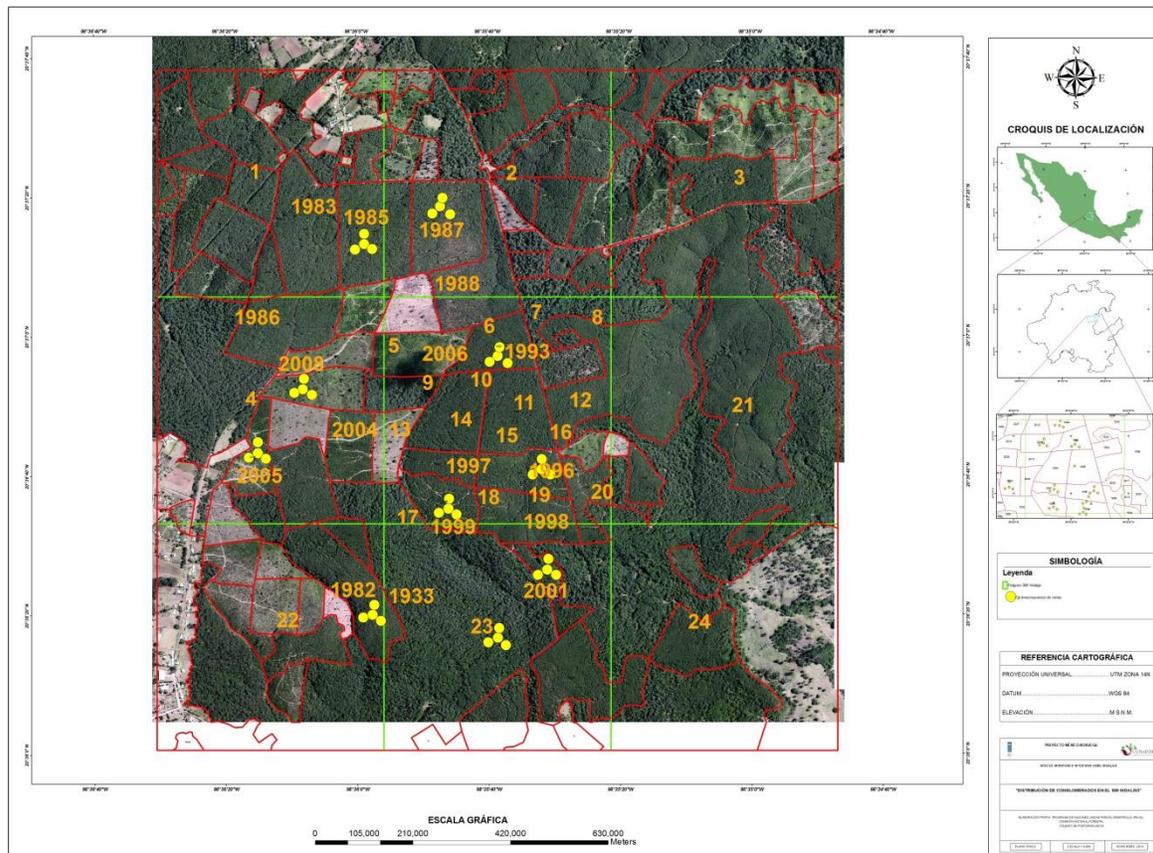
**Cuadro 11.** Tasas de descomposición ( $k$ ) y tiempo necesario para que desaparezca el 50 y el 99% de la masa de las acículas de *Pinus patula* en rodales con diferente edad en el SMIC- Hidalgo.

Año de aprovechamiento	$k$ (año <sup>-1</sup> )	Pérdida del 50% (años)	Pérdida del 99% (años)
BSM	0.51	1.43	10.32
1988	0.37	1.86	13.39
1998	0.46	1.58	11.39
2008	0.56	1.33	9.57

### C. Descomposición del material leñoso

- **Diseño de muestreo en campo**

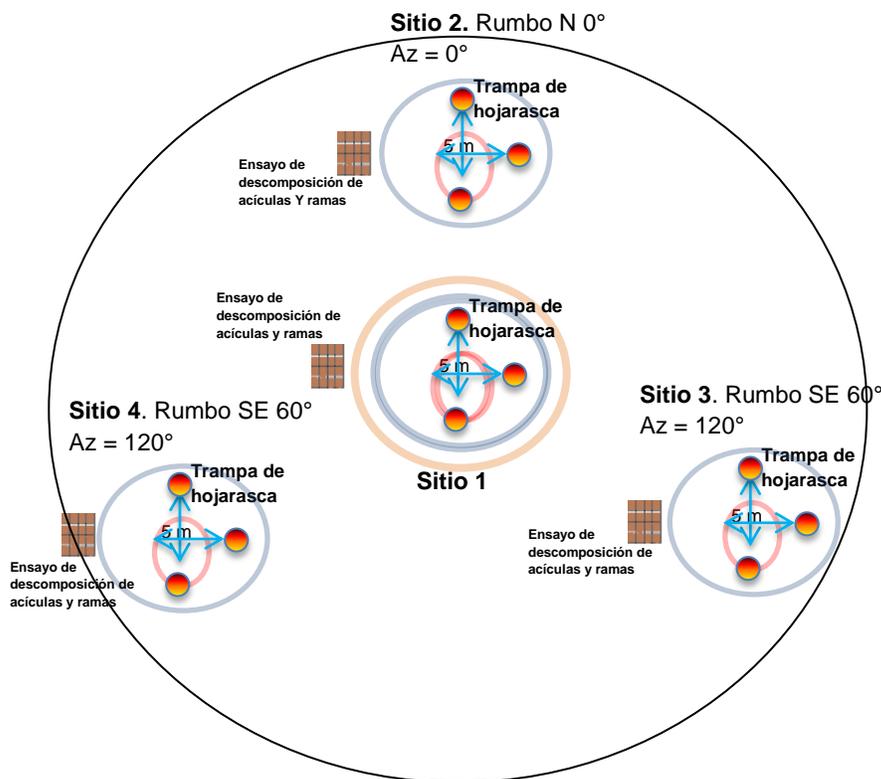
Se establecieron 3 los lotes por unidad permanente de muestreo (sitio 2, 3 y 4) para descomposición de ramas de pino y encino en 10 conglomerados donde se establecieron las trampas de hojarasca (Figura 32, Cuadro 12). Los lotes se ubicaron a 12 m al oeste de cada sitio como se muestra en la Figura 33. Cada lote estuvo compuesto por 6 ramas finas, 4 ramas medianas y 2 gruesas todas de pino y encino. El criterio de selección de las especies fue en base al índice de valor de importancia de las especies del SMIC Hidalgo así como la frecuencia y especies con mayor frecuencia que correspondieron a *Pinus patula* y *Quercus sp* (especies, laurina y rugosa).



**Figura 32.** Distribución de unidades permanentes de muestreo donde se estableció el ensayo de descomposición de ramas.

Antes de colocar las ramas se pesaron para conocer el peso inicial, que sirvió para evaluar la variación de la pérdida de masa después de las colectas.

Etiquetado: Se colocaron en los conglomerados seleccionados ramas de las especies de *Pinus patula* y *Quercus sp*, aun lado de las ramas se le colocó una etiqueta de aluminio con la información del Cgl/no. lote/especie/número de rama.



**Figura 33.** Diseño y ubicación de los lotes en el conglomerado para evaluar la descomposición de acículas y ramas.

**Cuadro 12.** Unidades de muestreo permanente donde se establecieron los ensayos de descomposición de ramas.

Conglomerado	Anualidad	Edad
23	1933	80
1982	1982	31
1985	1985	28
1987	1987	26
1993	1993	20
1996	1996	17
1999	1999	14
2001	2001	12
2005	2005	8
2008	2008	5

### Colecta de ramas en campo y Secado del material colectado en laboratorio

Las colectas de las ramas finas se realizaron cada 2 meses, las medianas cada 3 meses y las gruesas cada seis meses. Las ramas colectadas se colocan en bolsas de papel previamente etiquetadas para su correcta identificación y posteriormente se llevaron al laboratorio en donde se secan a 70 °C hasta obtener el peso constante (Robertson- *et al.*, 1999) y se registraron en el formato de laboratorio correspondiente (Anexo 8).

## D. Producción de raíces

### • Núcleos de crecimiento interno

Las especies forestales presentan dos clases de raíces: gruesas y finas. Las primeras son más profundas y su principal función es la de soporte; mientras que las finas aunque son más efímeras y con diámetros mucho menores (<2 mm), son las que tienen mayor actividad, funcionalidad y presentan tasas de descomposición y crecimiento altamente dinámicas (Persson y Stadenberg, 2009). Debido a éstas características, la producción de raíces finas y sus tasas de recambio juegan un papel determinante en la dinámica del carbono de los bosques (Da-Lun *et al.*, 2010). Aunque solo pueden aportar menos del 2% de la biomasa total del ecosistema, contribuyen aproximadamente cerca del 30 al 50% del carbono ciclado anualmente en algunos bosques (Vogt *et al.*, 1996) y el 33% de la producción primaria neta anual global (Vogt *et al.*, 1998; Da-Lun *et al.*, 2010). Adicionalmente, las raíces finas pueden representar entre el 90 y 95 % de la longitud total de las raíces. Por los tanto constituyen la mayor superficie de contacto con el suelo, que a su vez representa el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas forestales (Baker *et al.*, 2001). En bosques templados la biomasa de raíces ha estimado en menos del 36% de la biomasa aérea (Santantonio, 1980) con un valor aproximado de  $220 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  (Jarvis *et al.*, 2001).

De esta forma, la producción en biomasa de las raíces finas es altamente variable dependiendo de la época de muestreo, de la calidad del sitio (nutrimentos y agua), de las condiciones ambientales, edáficas, la composición de especies y de las perturbaciones; que en conjunto pueden alterar la frecuencia y extensión de las tasas de recambio y de la producción de las raíces finas (Baker *et al.*, 2001; Hertel y Leuschner, 2002). Por ello, el proceso de mortalidad de

las raíces finas es de gran relevancia para el crecimiento y la producción de éstas; pero además constituye un de las principales vías de la entrada de materia orgánica al suelo (Persson, 1980). De tal forma que las raíces finas al encontrarse en constantemente proceso de cambio, su muerte y sustitución tienen lugar simultáneamente (Makkonen y Helmisaari, 1998; Eissenstat y Yanai, 2002). Las tasas de recambio de las raíces finas (vivas y muertas) pueden verse afectadas fácilmente por los cambios en su ambiente, tales como la disponibilidad de agua y de nutrientes, las condiciones ambientales, la edad del rodal, la asignación de biomasa y carbono. Además, el crecimiento de las raíces finas puede verse afectado por la edad, la especie, la asignación de biomasa y carbono, la disponibilidad de agua y nutrientes, resistencia del suelo (densidad y compactación), aireación del suelo y toxicidad (Makkonen *et al.*, 1998) y cambios en la composición vegetal (Xiao *et al.*, 2008; Persson y Standenberg, 2009). Pese a la importancia de la función del sistema radical en el establecimiento de las especies después de un disturbio, como es la gestión forestal, se carece de información sobre la dinámica de las raíces finas. La mayoría de los estudios en México han recurrido a la utilización de los estándares internacionales o el uso de los promedios internacionales para reportar la biomasa de las raíces finas como una relación con la parte aérea del ecosistema. Por otra parte, diversos métodos directos e indirectos han sido desarrollados para la estimación de la producción de las raíces finas. Sin embargo, éstas mediciones generalmente aún no hay llegado a ser estandarizadas, pueden llegar a presentar alto nivel de incertidumbre, producir cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo o bien pueden ser muy intensas, laboriosas y extremas en los tiempos requeridos (Hirano *et al.*, 2009), lo cual hace más difícil la comparación de resultados.

En el caso de México, son pocos los estudios dirigidos a la cuantificación de la producción del sistema radical, como uno de los principales disparadores en el establecimiento exitoso de las especies después de la aplicación de la corta de regeneración, relacionado con el desarrollo del rodal y el mantenimiento de las funciones de regulación del ecosistema. Por ello, el objetivo del

estudio presentado fue cuantificar el crecimiento, la producción, las tasas de recambio de las raíces finas total y su categorización en vivas y muertas, en el SMIC-Hidalgo.

- **Diseño de muestreo en campo**

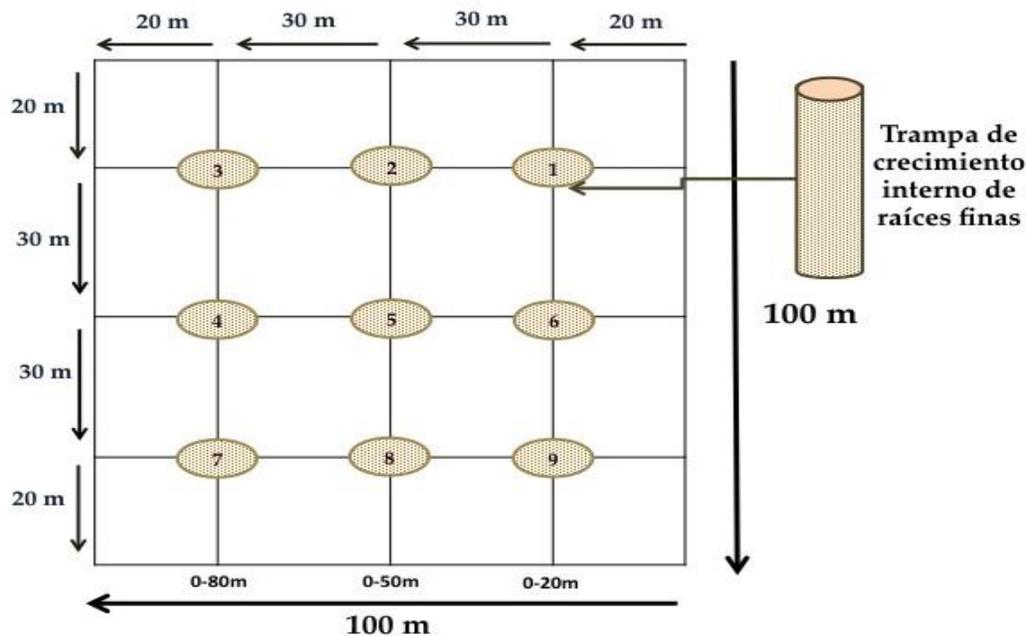
En el SMIC-Hidalgo se seleccionaron los rodales de las anualidades 1983, 1995 y 2005, con 30, 18 y 7 años de edad, respectivamente. Cada anualidad correspondió al año en que fue aplicada la corta de regeneración. Adicionalmente, fue seleccionada un área sin intervención silvícola de aproximadamente 80 años, la cual fue utilizada en el presente estudio como aérea de referencia (AN).

Para llevar a cabo el seguimiento del crecimiento de las raíces finas se utilizó la técnica de muestreo núcleos de crecimiento interno de raíces (NCI), conocida en inglés como “*Ingrowth cores*” y que es sugerida para especies de rápido crecimiento (Vogt *et al.*, 1998; Steingrobe *et al.*, 2001), tal como lo es *Pinus patula*. Ésta técnica representó una herramienta en la comparación del crecimiento de raíces entre rodales de diferente edad. Este método consistió en reemplazar un núcleo de suelo intacto removido, por otro equivalente del mismo sitio libre de raíces. En cada toma de suelo para tamizar, se trató en todo momento de respetar el perfil del suelo (Metcalf *et al.*, 2008). El suelo para rellenar las trampas fue tamizado a través de dos tamaños de mallas (2 y 5 mm) con la finalidad de remover las raíces de éste suelo. En éste estudio se consideraron raíces finas aquellas con diámetros  $\leq 2$ mm.

En cada rodal y AN se estableció una parcela de 1 ha, de acuerdo al método propuesto por Metcalf *et al.* (2008), representada en un cuadrado de 100 x 100 m (Figura 25). Dentro de cada parcela fueron instalados 9 NCI a una equidistancia de 30 m entre cada núcleo. En el perímetro de cada NCI se dejó una distancia de 20 m con la finalidad de minimizar los efectos de borde del suelo y la vegetación circundante.

Los NCI fueron insertados en una cavidad realizada en el suelo del mismo diámetro que los NCI, a una profundidad de 30 cm, una vez removida la capa orgánica superficial del suelo. En cada

NCI se le dejó una pestaña de 3 cm por arriba del suelo, con la finalidad de facilitar la posterior extracción de la trampa. El período de tiempo de incubación para cada NCI fue en total 70 días, de los cuales 10 correspondieron a un período de acondicionamiento del sustrato dentro de cada NCI.



**Figuras 25.** Diseño de muestreo espacial de los núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el SMIC-Hidalgo (Modificado de Metcalfe *et al.*, 2008).

La biomasa de raíces totales (almacenadas en suelo) se calculó y se reportó como la masa por área de superficie ( $\text{g m}^{-2}$ ). La producción anual fue estimada como la sumatoria de la biomasa estimada en cada NCI ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) (Rytter, 1999).

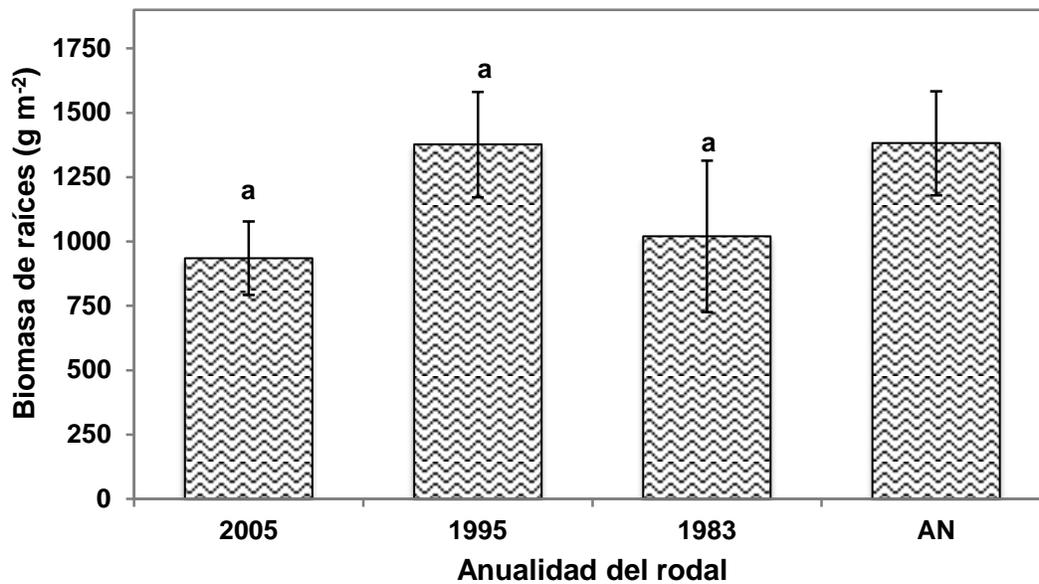
Por su parte, la tasa de recambio de las raíces finas fue calculada como el producto entre la producción anual y la diferencia entre el máximo y mínimo de biomasa de raíces finas. Éstas tasas indicaron la tasa específica de mortalidad de raíces en unidades de años ( $\text{años}^{-1}$ ) (Eissenstat y Yanai, 2002). Es decir, las tasas de recambio en el presente estudio, fueron

consideradas como el número de veces en que el sistema radical completo muere y vuelve a ser sustituido en el período de un año (Osawa y Aizawa, 2012; Lukac, 2012).

- **Estimación del recambio de raíces**

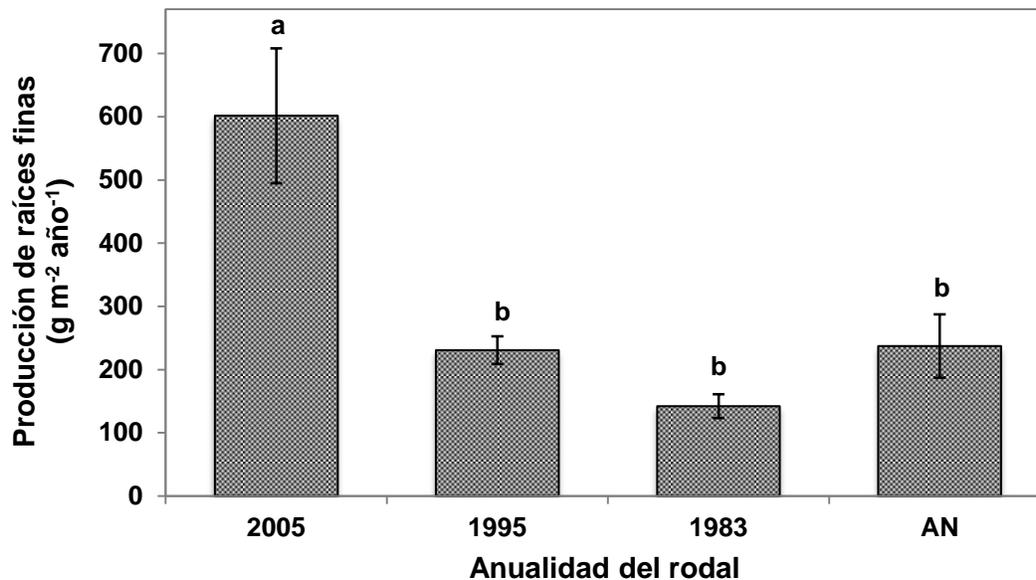
La biomasa de raíces encontrada en el reservorio del suelo a una profundidad de 30 cm en el área de estudio, no mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las diferentes edades de los rodales bajo aprovechamiento y el AN (Figura 26); sin embargo, el rodal de la anualidad 1995 (17 años de edad) presentó una biomasa de raíces casi igual a la encontrada en el AN, de aproximadamente 80 años de edad (1376.6 y 1381.9 g m<sup>-2</sup>, respectivamente). Éste comportamiento fue similar entre el rodal más joven de anualidad 2005 y el de mayor edad de anualidad 1983, es decir presentaron una biomasa de raíces muy cercana entre ellos (934.9 y 1019.9 g m<sup>-2</sup>, respectivamente), con tan sólo una diferencia del 9% entre edades. Además, el rodal de mayor edad de anualidad 1983, presentó una biomasa de raíces 26% menor que la encontrada en el AN (Figura 26); mientras que el rodal más joven de anualidad 2005, fue el que presentó la menor cantidad de biomasa de raíces (934.9 g m<sup>-2</sup>), con una biomasa de raíces aproximadamente del 68% de la encontrada en el AN (1381.9 g m<sup>-2</sup>).

De éste reservorio de biomasa subterránea, las raíces finas (>2mm) representaron entre el 17 y 39% de la biomasa total, mientras que las raíces gruesas ( $\leq 2$ mm) entre el 60 y 82% (Figura 26). Dentro de cada categoría (gruesas y muertas), no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las diferentes edades de la cronosecuencia. El mayor porcentaje de biomasa de raíces finas se encontró en los rodales bajo aprovechamiento forestal (28 al 39%), con una biomasa entre 274.2 y 292.3 g m<sup>-2</sup>; mientras que el AN presentó la menor biomasa de raíces finas, con 289.7 g m<sup>-2</sup>, el 17% de las raíces finas total. Por su parte, las raíces gruesas se observaron casi igualadas en su biomasa, para el rodal de anualidad 1995 (1027.2 g m<sup>-2</sup>) con el AN (1019.9 g m<sup>-2</sup>); y lo mismo ocurrió para los rodales de anualidad 2005 y 1993, con una biomasa de 734.9 y 790.9 g m<sup>-2</sup>, respectivamente.



**Figura 26.** Biomasa subterránea (g m<sup>-2</sup>) en el reservorio del suelo a una profundidad de 30 cm, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el SMIC-Hidalgo. AN es un área sin aprovechamiento forestal de aproximadamente 80 años de edad.

La producción anual de raíces finas totales (vivas y muertas), presentó una disminución con la edad del rodal (Figura 27). De tal forma, que el rodal más joven, de anualidad 2005, fue donde se presentó la mayor producción anual (601.3 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>) siendo además, el único rodal que fue estadísticamente diferente ( $p \leq 0.05$ ) a las demás edades de la cronosecuencia.



**Figura 27.** Producción anual de raíces finas ( $\text{g m}^{-2} \text{año}$ ) totales (vivas y muertas), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido de Atopixco Zacualtipán, Hidalgo. AN es un área sin aprovechamiento forestal de aproximadamente 80 años de edad.

Las raíces en el reservorio del suelo a una profundidad de 30 cm en el bosque de *Pinus Patula*, no presentó un patrón definido respecto a la edad del rodal; lo que sugiere que un rodal bajo un aprovechamiento forestal adecuado puede desarrollar un sistema radical que permite el desarrollo, crecimiento y recuperación de las funciones del ecosistema después de la corta de regeneración. De éste reservorio de raíces, las finas ( $\leq 2\text{mm}$ ) representaron del 17 al 39%, y su variación de crecimiento estacional no presentó un patrón definido respecto a las diferentes edades de la cronosecuencia en el bosque de *Pinus patula*. El mayor crecimiento se presentó en el período de julio a septiembre (verano) y el menor en el período de noviembre a enero (invierno).

- **Minirizotrófon**

Se seleccionaron los rodales de las anualidades 1983, 1995 y 2005, con 30, 18 y 7 años de edad, respectivamente para la instalación de tubos del minirizotrófn. Se instalaron 3 tubos por edad del rodal (Figura 28). Cada anualidad correspondió al año en que fue aplicada la corta de regeneración. Adicionalmente, fue seleccionada un área sin intervención silvícola de aproximadamente 80 años, la cual fue utilizada en el presente estudio como área de referencia (AN). La toma de la fotografías se realiza en forma mensual.



**Figura 29. Fotografías tomadas con el escaner del minirrizotrón para la medición de crecimiento de raíces finas y muestras de crecimiento de raíces finas (AN).**

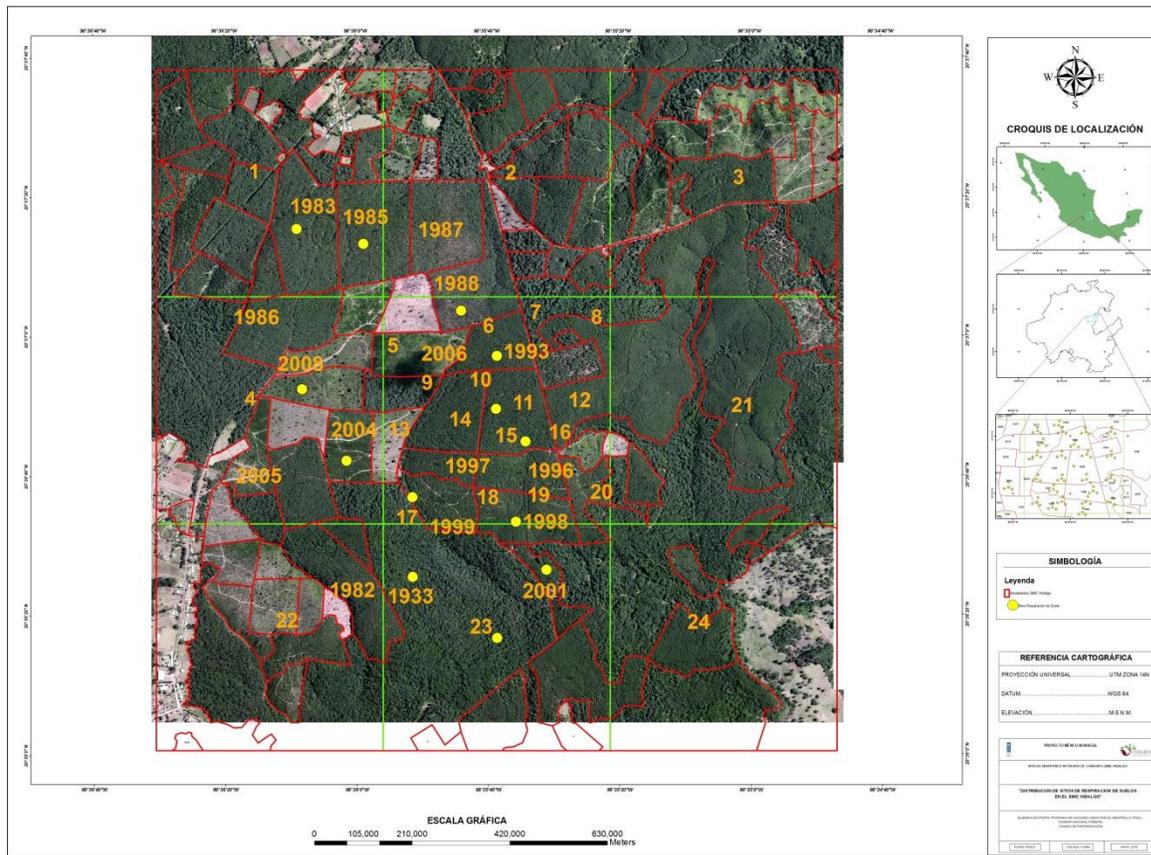
### E. Flujos del carbono del suelo

- **Diseño de muestreo en campo**

La medición del flujo de CO<sub>2</sub> del suelo está en proceso de medición. Los anillos se establecieron en 12 unidades de muestreo primarias (Figura 35). Se colocaron 5 aros por sitio. El equipo utilizado es una cámara de respiración de suelos LI-8100A Automated Soil Gas Flux System (Figura 34).



**Figura 34. Instalación de anillos y medición del flujo de CO<sub>2</sub> del suelo con el equipo LI-8100A Automated Soil Gas Flux System en el SMIC-Hidalgo.**



**Figura 35.** Distribución de sitios en donde se está midiendo respiración de suelos con cámara (LI-8100A Automated Soil Gas Flux System)

## CAPÍTULO VII. Intercambio de carbono entre el ecosistema y la atmósfera.

## A. Sensores remotos.

La medición de biomasa se realiza tradicionalmente a través de muestreos en campo que sirven de base para dimensionar un inventario forestal definitivo considerando un nivel de error permitido. Esta situación implica tiempo y costos considerables para la obtención de los parámetros biofísicos de interés.

La introducción de la tecnología conocida como teledetección abrió opciones para la ejecución de estos trabajos de forma más eficiente. Una de las principales ventajas de esta tecnología es la capacidad de obtener datos espacialmente explícitos en grandes áreas de manera oportuna y económica. Por ello se ha utilizado en diferentes tipos de bosques como un medio para obtener estimaciones espacialmente continuas de las variables estructurales, tal es el caso de los sensores ópticos pasivos como las imágenes Landsat TM (Hall *et al.*, 2005).

En la actualidad existe otro tipo de tecnología de teledetección que permite obtener información tridimensional del bosque. Tal es el caso de LiDAR (Light Detection And Ranging) y Radar (Radio Detection and Ranging), las cuales detectan la respuesta reflejada de los objetos que son iluminados a partir de fuentes de energía generada de manera artificial, y que ofrecen mejores alternativas para estudiar este tipo de variables (Hall *et al.*, 2005).

Dentro de las cualidades que ofrece LiDAR, se encuentra su alta resolución espacial y buena penetración en el dosel para obtener variables dasométricas tales como altura de los árboles, área basal, área de la copa, densidad y la clasificación de grupos de especies (Van Aardt *et al.*, 2008) características que son valiosas en evaluaciones ambientales para definir posteriormente, y a través de mediciones indirectas, cantidad de biomasa o volumen de madera en bosques (Navarro *et al.*, 2010).

A pesar de que, estas variables son relativamente simples de obtener, los conocimientos y técnicas para el procesamiento de datos LiDAR en estudios del sector forestal de México no están suficientemente desarrollados para su aplicación directa. La literatura apenas reporta estudios de obtención de variables dasométricas a partir de datos LiDAR en zonas específicas de

México, lo que justifica realizar un estudio con el propósito de estimar variables dasométricas empleando esta tecnología en una zona de interés.

- **Datos LiDAR**

El vuelo para obtener los datos LiDAR se llevó a cabo durante el mes de mayo de 2012. El proveedor de la información utilizó un sistema LiDAR Riegl-VQ480 (Cuadro 13), equipado con un receptor GPS/IMU NovAtel, además colocaron dos estaciones GPS L1/L2 (L1/L2: frecuencias duales esenciales para eliminar el error causado por la refracción ionosférica) al momento de la adquisición de datos.

El proveedor usó además información de tres estaciones fijas de la Red Geodésica Nacional Activa establecida por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) como referencia absoluta para el cálculo y ajuste de las trayectorias. Las estaciones están localizadas en Puebla (ICEP), Tampico (TAMP) y Toluca (TOL2).

Cuadro 13. Características del sensor LiDAR utilizado.

Sensor LiDAR	Riegl VQ-480
Frecuencia del pulso	200 Khz
Ángulo de barrido	+ - 15°
Densidad de puntos por pasada	5 ptos/m <sup>2</sup> <i>sin embargo como la sobreposición de 50 % tenemos una densidad real de 10 ptos/m<sup>2</sup></i>
Altitud de vuelo	397 m (1,300 ft)
Velocidad de vuelo	80-90 nudos
Sobreposición de las líneas de vuelo	50 %
Radio del pulso	30 cm
Precisión absoluta de la medición vertical	+ - 0.15 m en áreas abiertas planas y 0.5 m en zonas boscosas o pendientes mayores de 20 %
Precisión absoluta de la medición horizontal	+ - 0.5 m en áreas planas y 0.75 m. en áreas con pendiente.

- **Software**

Para el análisis de los datos LiDAR fue necesario realizar una serie de pasos que permitieron en primera instancia validar la calidad de los datos que el proveedor ofreció, obtener el modelo digital de elevación para contar con una referencia con respecto al nivel del mar; así mismo ejecutar los diversos procesos para obtener las métricas a nivel de parcela y del conjunto entero de los datos LiDAR.

El software que se utilizó en el manejo de los datos LiDAR fue FUSION/LVD versión 3.21 (McGaughey, 2012) Es un software libre desarrollado por el Forest Service Remote Sensing Applications Center (RSAC) del Departamento Forestal de Estados Unidos. FUSION permite procesar datos vectoriales de LiDAR por medio de algoritmos orientados a mediciones forestales.

Las variables que se midieron en campo para alimentar los modelos de cálculo de área basal, biomasa, cobertura arbórea y volumen fueron el diámetro normal (DN), la altura total de los árboles (H), la altura del fuste limpio (h) y el diámetro de copa (DC).

- **Información de campo**

La información obtenida en campo resultó de implementar el diseño de muestreo sistemático estratificado por conglomerado implementado por la CONAFOR, esto con la finalidad de que la información obtenida en este estudio sirva para mejorar las estimaciones de acumulación de carbono y permita su escalamiento regional al ligarlos con los datos obtenidos en sitios similares levantados por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS).

Una vez que se contó con las variables de campo y las métricas de LiDAR (por sitio) concentradas en la tabla de modelado, se estudiaron las relaciones entre las variables de respuesta (área basal, biomasa, cobertura arbórea y volumen) con cada una de las variables predictoras (métricas de LiDAR) a fin de conocer su comportamiento. De los 160 sitios de muestreo se eliminaron del análisis tres sitios; dos de ellos debido a que no había correspondencia entre las estimaciones hechas en campo y lo captado por LiDAR, a causa del aprovechamiento maderable días antes del muestreo en campo y una parcela más se eliminó porque estaba dentro del área de influencia de otra parcela que ya se había muestreado.

Con los 157 sitios finales, se escogieron al azar, con fines de validación, los sitios número 3 de cada conglomerado (en total 38), estos quedaron excluidos del proceso de ajuste de modelos, empleando finalmente sólo 119 sitios. A continuación, se realizó un análisis de correlación de Pearson empleando el paquete estadístico SAS 9.0 (SAS, Institute Inc. 2002), este fue un primer filtro de variables explicativas, desechando aquellas que no aportaban información o que su correlación era muy baja. Este proceso se hizo para cada una de las variables: área basal, biomasa, cobertura arbórea y volumen.

Una vez identificadas las métricas LiDAR relevantes (significativas) para explicar las variables de interés mediante modelos de regresión, estas se extrajeron mediante el comando GridMetrics de FUSION para cada celda que conforma el área de estudio. Finalmente, esas métricas se utilizaron para alimentar los modelos resultantes del análisis de regresión lineal múltiple (previa transformación de formato ascii a ráster), generando así la cartografía de área basal, biomasa, cobertura arbórea y volumen mediante diferentes procesos en el software ArcGIS 9.

- **Resultados**

Se encontraron correlaciones positivas entre las métricas de LiDAR y las variables forestales área basal, volumen, biomasa y cobertura arbórea. Por simplicidad, no todas las métricas se presentan en el Cuadro 14. Estos resultados coinciden con el trabajo reportado por Means, (1999) donde indica que existe una fuerte correlación entre el área basal y la altura derivada por el sensor SLICER, situación similar sucede con la biomasa total estimada en un bosque de coníferas.

A partir de esta información y después de realizar los procesos de regresión lineal múltiple, Stepwise y de regresión forzada se eligieron las métricas de LiDAR que mejor predicen a las variables forestales área basal, biomasa aérea, cobertura arbórea y volumen en el área de estudio (Cuadro 8). El criterio para la selección de los modelos fue el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la significancia de cada una de las variables involucradas.

Cuadro 14. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables forestales: área basal, volumen, biomasa y cobertura arbórea con las métricas de LiDAR.

Métricas LiDAR	Área basal*	Volumen*	Biomasa*	Cobertura arbórea*
Conteo total de retornos sobre 1	0.71	0.65	0.65	0.58
Conteo del retorno 1 sobre la altura de 1	0.71	0.60	0.59	0.62
Conteo del retorno 2 sobre la altura de 1	0.66	0.65	0.66	0.49
Elevación del percentil 70	0.64	0.76	0.75	
Elevación del percentil 75	0.64	0.76	0.75	
Porcentaje de primeros retornos sobre 3	<b>0.85</b>	0.76	0.75	0.66
Porcentaje de todos los retornos sobre 3	0.83	0.74	0.75	0.69
Porcentaje de todos los retornos sobre la altura media	0.85	0.78	0.75	0.59
(Todos los retornos sobre la altura media) / (Total de primeros retornos) * 100	0.83	<b>0.79</b>	<b>0.77</b>	0.55
Índice de penetración del láser	0.78	0.67	0.68	<b>0.71</b>

\* Significancia <0.0001

A partir de esta información y después de realizar los procesos de regresión lineal múltiple, Stepwise y de regresión forzada se eligieron las métricas de LiDAR que mejor predicen a las variables forestales área basal, biomasa aérea, cobertura arbórea y volumen en el área de estudio (Cuadro 15). El criterio para la selección de los modelos fue el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la significancia de cada una de las variables involucradas.

Para los modelos de área basal, biomasa y volumen, las variables predictoras presentes en la función son aquellas que describen la estructura vertical del dosel, específicamente el valor de algún percentil (0-99). El modelo de biomasa que se generó incluye la métrica de elevación del percentil 50, misma situación sucede con el modelo reportado por Bortolot y Wynne (2005), en el que utilizaron el cuadrado de la altura media para calcular biomasa aérea. Al aplicar dicho modelo en el proceso de validación encontraron una  $R^2$  de 0.50 a 0.53. Cabe aclarar que sólo emplearon esta métrica y nuestro modelo emplea dos variables más, por lo que claramente se observa un mayor valor de  $R^2$  (0.76).

Cuadro 15. Modelos de regresión lineal múltiple y variables seleccionadas para la estimación de variables forestales: área basal ( $m^2/sitio$ ), biomasa ( $kg/sitio$ ), cobertura arbórea ( $m^2/sitio$ ) y volumen ( $m^3/sitio$ ).

Modelo	R <sup>2</sup> ajustada	RMSE	Param.	Estimación	Signif.
AB= A0+A1*Elevación media +A2*Elevación del percentil 70+A3*Porcentaje de todos los retornos sobre la media	0.77	0.21	A0	-0.16455	0.0069**
			A1	0.066837	0.0011**
			A2	-0.03704	0.0231*
			A3	0.022009	<.0001**
BIOM=A0+A1*((Todos los retornos sobre tres) / (Total de primeros retornos) * 100))+A2*Elevación del percentil 50+A3* Coeficiente de variación de intensidad	0.76	1340.0 8	A0	2832.088	0.0004**
			A1	39.51389	<.0001**
			A2	224.1344	<.0001**
			A3	-10921.2	<.0001**
COB=A0+A1*índice de penetración láser+ A2*Desviación absoluta de la mediana	0.53	139.71	A0	-89.5733	0.0558*
			A1	911.8164	<.0001**
			A2	22.47737	0.0136*
VOL=A0+A1*((Todos los retornos sobre la altura media) / (Total de primeros retornos) * 100))+ A2* Elevación media cuadrática+A3*Coeficiente de variación de intensidad	0.79	2.07	A0	2.812044	0.0027**
			A1	0.109815	<.0001**
			A2	0.404383	<.0001**
			A3	-16.6025	<.0001**

\* $\leq 0.05$  Significativo, \*\* $\leq 0.01$  Muy significativo, Param: Parámetros.

Con la finalidad de validar los modelos generados, las estimaciones obtenidas a través de éstos se compararon con los valores medidos en campo para cada una de las variables de interés (Figura 36). El ajuste de modelos lineales a los datos predichos y observados indica factores de ajuste (pseudo R<sup>2</sup>) de 0.84 para área basal, de 0.85 para biomasa aérea y volumen y de 0.57 para la cobertura arbórea, dicho factor nos indica cuanto las estimaciones predichas se asemejan a las estimaciones observadas en campo.

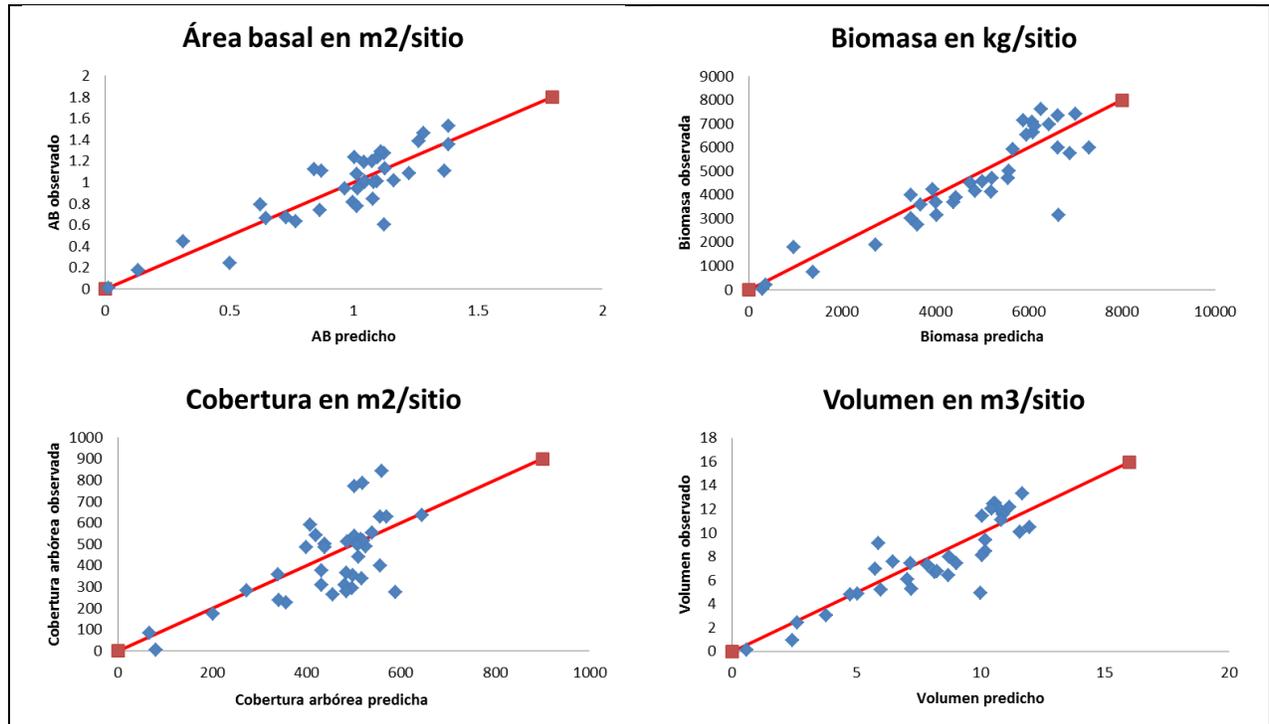


Figura 36. Área basal (m<sup>2</sup>), biomasa (kg), cobertura (m<sup>2</sup>) y volumen (m<sup>3</sup>) por sitio observado frente a lo predicho. La línea roja muestra la relación 1 a 1. La pseudo r<sup>2</sup> es de 0.84, 0.85, 0.57 y 0.85 respectivamente.

Con las ecuaciones de regresión ajustadas para la biomasa, se predijeron valores para cada grid (celda por celda) a partir de sus correspondientes datos láser almacenados en las métricas generadas a nivel de grid. Con esta información se generaron mapas que describen la variabilidad espacial de la biomasa (Figuras 37). Así mismo se estimó el inventario total para los parámetros área basal, biomasa aérea, cobertura arbórea y volumen. Los resultados se presentan en el Cuadro 16 para el área completa de estudio.

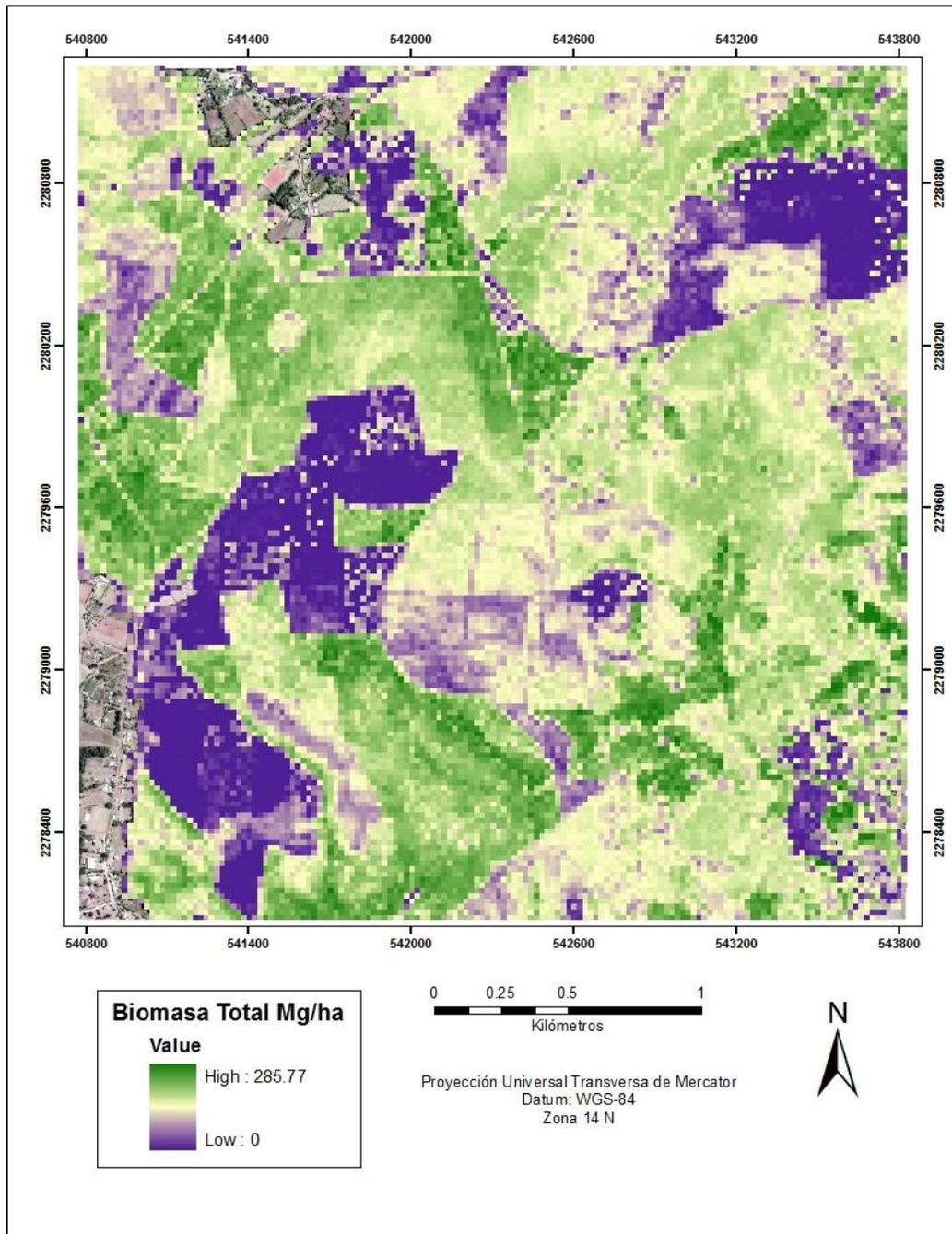


Figura 37. Representación cartográfica de la biomasa total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en la zona de estudio.

Cuadro 16. Estimación promedio por hectárea y total de los parámetros forestales área basal, biomasa, cobertura arbórea y volumen mediante regresión lineal múltiple.

	Área basal m <sup>2</sup>		Biomasa Mg		Cobertura arbórea		Volumen m <sup>3</sup>	
	ha	Total	ha	Total	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	%	ha	Total
<b>Media</b>	23.41	21,068.26	127.62	114,862.48	11,170.95	111.70	202.11	181,747.45
<b>IC+</b>	25.38	22,838.15	139.51	125,563.27	12,350.13	123.50	219.99	197,992.23
<b>IC-</b>	21.54	19,386.81	116.39	104,753.88	10,052.52	100.52	185.07	166,566.62
<b>Precisión %</b>	8.0		8.8		10.0		8.4	

IC: Intervalo de confianza al 95 %

### Consideraciones finales

Los resultados demuestran que la estimación de variables dasométricas como el área basal, la biomasa total, la cobertura arbórea y el volumen a partir de datos LiDAR, pueden ser generados con buena precisión y con la ventaja de poder generar una serie de mapas que exponen la variabilidad espacial para cada una de las variables dasométricas de interés.

La mayoría de las correlaciones entre las métricas obtenidas a partir de LiDAR y las variables forestales estuvieron por encima de 0.50, siendo la variable área basal la que presentó mayor correlación con la métrica relacionada al dosel: Porcentaje de primeros retornos sobre tres ( $R^2=0.85$ ).

Los percentiles de altura y las métricas relacionadas al dosel (tasas de retorno sobre una altura de corte) fueron las que mejor describieron a las variables forestales área basal, biomasa total, cobertura arbórea y volumen, por lo que se enfatiza su uso para seguir explorando nuevos modelos y determinar el inventario total en investigaciones futuras.

Las estimaciones totales obtenidas mediante los métodos de regresión lineal, así como mediante los estimadores de razón y regresión se consideran buenas y aceptables ya que los valores se encuentran dentro del intervalo de confianza estimado mediante la metodología asociada a un inventario tradicional.

Las estimaciones obtenidas a partir de estimadores de razón y regresión son las que más se aproximan a las estimaciones obtenidas mediante un inventario forestal tradicional, pero el inconveniente inmediato es no poder plasmar la variabilidad de la variable de interés en un mapa. La información generada a partir de los datos LiDAR son una opción más para el monitoreo de los recursos forestales a una escala espacial pequeña y en un periodo de tiempo corto, a fin de medir y cuantificar el estado y desarrollo de los bosques, así como la cantidad de madera y biomasa existente.

## CAPÍTULO VIII. Dinámica del carbono en el SMIC Hidalgo.

Se integraron las estimaciones de biomasa aérea a nivel de paisaje junto con sensores remotos, particularmente LiDAR. Como se discutió en el apartado correspondiente, las estimaciones derivadas de la información de LiDAR estuvieron dentro del intervalo de confianza de las estimaciones hechas con inventario tradicional.

Por otro lado, debido a que la operación de la torre de flujo ha sido intermitente, no fue posible hacer la integración de los dos componentes mencionados con la información derivada del intercambio neto de CO<sub>2</sub> del ecosistema. La operación de la torre se ha visto limitada por problemas de abasto de energía y por el mal funcionamiento del anemómetro sónico. Este último no se ha podido resolver debido a limitaciones de carácter logístico y de recursos. En cuanto el problema se resuelva, se podrá realizar la integración de los tres componentes del sistema.

### A. Retos

El establecimiento, operación y mantenimiento del sitio de investigación a largo plazo de la dinámica de carbono en ecosistemas bajo manejo forestal, denominado SMIC-Atopixco, ha representado diferentes retos, desde el punto de vista de gestión, así como técnico y logístico. Fue necesario convencer a los dueños de los terrenos forestales (ejidos y pequeños propietarios) para obtener el permiso para tener acceso y establecer la torre de flujo y los

conglomerados. Para lo anterior, se realizó un taller sobre el papel de los bosques en la mitigación del cambio climático, donde se tuvo la participación de personal del SEMARNAT delegación Hidalgo, la CONAFOR, el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América y el Colegio de Postgraduados.

El segundo reto importante fue el técnico, sobre todo para la instalación y operación de la torre de flujo. La carencia de personal calificado para la instalación, calibración y operación de instrumental que permite la medición en tiempo real de intercambio de CO<sub>2</sub>, agua y energía entre el ecosistema y la atmósfera a través de la técnica de Eddy Covariance, fue un verdadero reto. Se tuvo la asesoría de personal especializado del Servicio Forestal de los Estados Unidos de América, así como de la red Mex-Flux.

Por otro lado fue necesario brindar instrucción a las brigadas de campo para el uso correcto del equipo para la ubicación y delimitación de las unidades de los conglomerados, así como para la utilización del equipo de medición.

## B. Sigüientes pasos

La cantidad de información colectada en el periodo de tres años ha sido tal que se necesita desarrollar una plataforma de asimilación de datos, que permita su síntesis y análisis, de tal manera que se puedan generar los reportes y pronósticos. En particular, en un futuro próximo se estará en condiciones para utilizar una plataforma de integración de estimaciones a través del uso de modelos ecosistémicos y de contabilidad de carbono. Se plantea que se comparen dos sistemas de modelaje, el Canadian Budget Model of the Canadian Forest Sector ver. 3 (CBM-CFS3), (Kurz et al., 2009) y el PnET, el cual es un modelo para analizar la dinámica de carbono, nitrógeno y flujos de agua (Aber and Driscoll, 1997). Con el uso de estas plataformas se podrán hacer pronósticos del comportamiento del ecosistema bajo escenarios de cambio climático.

Por otro lado, se contempla que el SMIC-Atopixco se mantenga como un sitio de investigación forestal a largo plazo, el cual permitirá generar información referente al efecto del manejo forestal sobre procesos ecológicos que impactan la productividad de los ecosistemas. De esta forma, se podrán desarrollar herramientas silvícolas para aprovechar el potencial productivo del sitio, sin poner en riesgo la permanencia de los recursos forestales.

Sin duda una de las fortalezas del SMIC-Atopixco es su integración en la Red Mex-SMIC, la cual es concebida como una red de instituciones de gobierno, académicas y de la sociedad civil con el objetivo del analizar la dinámica del carbono a nivel paisaje en ecosistemas estratégicos de México, importantes por su contribución tanto en la emisión como en la remoción de gases de efecto invernadero de la atmósfera. La consolidación de la red es un paso necesario que se contempla para el futuro, la cual depende grandemente del apoyo decidido de las instituciones de gobiernos involucradas en el sector ambiental y forestal.

## ANEXOS.

### Anexo 1. Código en R para la estimación de biomasa aérea.

```
#####  
#####Se cargan las librerías necesarias#####  
#####  
library(doBy)  
library(Carbono5)  
#####  
#####Se carga la dirección#####  
#####  
#Dirección de la cual se leerá el archivo  
setwd("C:/Users/BENJAMIN/Documents/Curso R_Alex Ponce/Estimaciones_Junio2015/Atopixco/1-Biomasa  
Aerea/Almacenes")  
#####  
#####Se lee la base#####  
#####  
#Se borra la memoria  
rm(list=ls(all=TRUE))  
#Se lee la base a nivel de arbolado  
BaseArbolado<-read.csv("BD SMI_Hidalgo_2013_2014_v5_oct_14_2014_28042015_b.csv")  
length(BaseArbolado$folio)  
#Se lee la base machote de los sitios  
BaseSitio<-read.csv("TblSitio.csv")  
length(BaseSitio$folio)  
#Se lee la base con las áreas de los estratos  
BaseAreas<-read.csv("AreasEstratos.csv")  
length(BaseAreas$Estrato)  
#Se lee la base a nivel de la cosecha de 1m2  
BaseCosecha1m2<-read.csv("TblCosecha1M2_LaboratorioSocio_PARC_ps_gm2_v3.csv")  
length(BaseCosecha1m2$folio)  
str(BaseCosecha1m2)  
BaseArbolado$dapReal<-BaseArbolado$dap  
BaseArbolado$dap<-as.numeric(as.character(BaseArbolado$dapReal))  
BaseArbolado$biomasaReal<-BaseArbolado$biomasa  
BaseArbolado$biomasa<-as.numeric(as.character(BaseArbolado$biomasaReal))  
BaseArbolado$carbonoReal<-BaseArbolado$carbono  
BaseArbolado$carbono<-as.numeric(as.character(BaseArbolado$carbonoReal))  
#A.1#####  
#####Se obtienen los estimadores de para árboles vivos <7.5 cm#####  
#####  
#####Se filtran los datos del ciclo 1#####  
BaseArboladoDep=BaseArbolado[BaseArbolado$ciclo_de_medicion==1,]  
length(BaseArboladoDep$folio)  
#####Se filtran las árboles vivos en "BaseArbolado" (condición 1)#####  
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[BaseArboladoDep$condicion==1,]  
length(BaseArboladoDep$folio)  
#Se filtran los datos del arbolado vivo con DAP<7.5cm (subsitio 1 y DAP<7.5cm)#  
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[BaseArboladoDep$id_subsitio==1 & BaseArboladoDep$dap<7.5,]  
length(BaseArboladoDep$folio)  
#####MANIPULACIÓN DE BASES DE DATOS#####  
#####Agregación de la "BaseArboladoDep" a nivel de sitio#####
```

```

###Se crea una variable "folio-sitio"
BaseArboladoDep$folio_sitio<-paste(BaseArboladoDep$folio,"-",BaseArboladoDep$sitio)
###Se agrega la "BaseArboladoDep" con "SUMAS" dasométricas
myfun_SitSum <- function(x){c(SumBio=sum(x[!is.na(x)]))}
BaseArboladoSitioSum<-0
BaseArboladoSitioSum<-summaryBy(BaseArboladoDep$biomasa + BaseArboladoDep$carbono ~
BaseArboladoDep$folio_sitio,
                                data=BaseArboladoDep,FUN=myfun_SitSum,keep.names=TRUE,
                                var.names=c("BiomTotalSitio7.5","CarbonoTotalSitio7.5"))
length(BaseArboladoSitioSum$folio_sitio)
BaseArboladoSitioSum7.5<-BaseArboladoSitioSum
#A.2#####
#####Se obtienen los estimadores de para árboles vivos >=7.5 & <20 cm#####
#####
#####Se filtran los datos del ciclo 1#####
BaseArboladoDep=BaseArbolado[BaseArbolado$ciclo_de_medicion==1,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#####Se filtran las árboles vivos en "BaseArbolado" (condición 1)#####
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[BaseArboladoDep$condicion==1,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#Se filtran los datos del arbolado vivo con 7.5cm>=DAP<20
#(subsitio=2 con 7.5cm>=DAP<20 & subsitio=1 con 7.5cm>=DAP<20)#
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[
BaseArboladoDep$id_subsitio==2 & BaseArboladoDep$dap>=7.5 & BaseArboladoDep$dap<20
| BaseArboladoDep$id_subsitio==1 & BaseArboladoDep$dap>=7.5 & BaseArboladoDep$dap<20,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#####MANIPULACIÓN DE BASES DE DATOS#####
#####Agregación de la "BaseArboladoDep" a nivel de sitio#####
###Se crea una variable "folio-sitio"
BaseArboladoDep$folio_sitio<-paste(BaseArboladoDep$folio,"-",BaseArboladoDep$sitio)
###Se agrega la "BaseArboladoDep" con "SUMAS" dasométricas
myfun_SitSum <- function(x){c(SumBio=sum(x[!is.na(x)]))}
BaseArboladoSitioSum<-0
BaseArboladoSitioSum<-summaryBy(BaseArboladoDep$biomasa + BaseArboladoDep$carbono ~
BaseArboladoDep$folio_sitio,
                                data=BaseArboladoDep,FUN=myfun_SitSum,keep.names=TRUE,
                                var.names=c("BiomTotalSitio7.5_20","CarbonoTotalSitio7.5_20"))
length(BaseArboladoSitioSum$folio_sitio)
BaseArboladoSitioSum7.5_20<-BaseArboladoSitioSum
#A.3#####
#####Se obtienen los estimadores de para árboles vivos >=20 cm#####
#####
#####Se filtran los datos del ciclo 1#####
BaseArboladoDep=BaseArbolado[BaseArbolado$ciclo_de_medicion==1,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#####Se filtran las árboles vivos en "BaseArbolado" (condición 1)#####
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[BaseArboladoDep$condicion==1,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#Se filtran los datos del arbolado vivo con DAP>=20
#(subsitio=3 con DAP>=20 & subsitio=2 con DAP>=20 & subsitio=1 con DAP>=20)#
BaseArboladoDep=BaseArboladoDep[
                                BaseArboladoDep$id_subsitio==3 & BaseArboladoDep$dap>=20 |
                                BaseArboladoDep$id_subsitio==2 & BaseArboladoDep$dap>=20 |

```

```

BaseArboladoDep$Id_subsitio==1 & BaseArboladoDep$dap>=20 ,]
length(BaseArboladoDep$folio)
#####MANIPULACIÓN DE BASES DE DATOS#####
#####Agregación de la "BaseArboladoDep" a nivel de sitio#####
###Se crea una variable "folio-sitio"
BaseArboladoDep$folio_sitio<-paste(BaseArboladoDep$folio,"-",BaseArboladoDep$sitio)
###Se agrega la "BaseArboladoDep" con "SUMAS" dasométricas
myfun_SitSum <- function(x){c(SumBio=sum(x[!is.na(x)]))}
BaseArboladoSitioSum<-0
BaseArboladoSitioSum<-summaryBy(BaseArboladoDep$biomasa + BaseArboladoDep$carbono ~
BaseArboladoDep$folio_sitio,
                                data=BaseArboladoDep,FUN=myfun_SitSum,keep.names=TRUE,
                                var.names=c("BiomTotalSitio20","CarbonoTotalSitio20"))
length(BaseArboladoSitioSum$folio_sitio)
BaseArboladoSitioSum20<-BaseArboladoSitioSum
#A.4#####
#####Se obtienen los estimadores de para la cosecha de 1 m2#####
#####Agregación de la información a nivel de parcela de 1 m2
#Se filtra el Ciclo
BaseCosecha1m2=BaseCosecha1m2[BaseCosecha1m2$ciclo==1,]
length(BaseCosecha1m2$folio)
#Se filtran las parcelas levantadas en Enero 2014
BaseCosecha1m2=BaseCosecha1m2[BaseCosecha1m2$id_parcela<=6,]
length(BaseCosecha1m2$folio)
#Se crea la variable "FolioSitioParcela"
BaseCosecha1m2$FolioSitioParcela<-paste(BaseCosecha1m2$folio,"-
",BaseCosecha1m2$sitio,"/",BaseCosecha1m2$id_parcela)
###Se agrega la "BaseCosecha1m2" a nivel de "Parcelas"
myfun_SitParSum <- function(x){c(SumBio=sum(x[!is.na(x)]))}
BaseCosecha1m2$Pacela<-0
BaseCosecha1m2$Pacela<-summaryBy(BaseCosecha1m2$biomasa ~ BaseCosecha1m2$FolioSitioParcela,
                                data=BaseCosecha1m2,FUN=myfun_SitParSum,keep.names=TRUE,
                                var.names=c("Biomasa_gP1m2"))
length(BaseCosecha1m2$Pacela$FolioSitioParcela)
#####Agregación de la información a nivel de parcela de Sitio
#Se crea la variable "Folio-Sitio"
BaseCosecha1m2$Pacela$FolioSitio<-substr(x = BaseCosecha1m2$Pacela$FolioSitioParcela, start = 1,
                                        stop =(regexpr("/",BaseCosecha1m2$Pacela$FolioSitioParcela)-2))
#Se crea la variable para contar el número de parcelas por sitio
BaseCosecha1m2$Pacela$ContadorParcelas<-ifelse(is.na(BaseCosecha1m2$Pacela$Biomasa_gP1m2),NA,1)
###Se agrega la "BaseCosecha1m2" a nivel de "Parcelas"
myfun_SitSum <- function(x){c(SumBio=sum(x[!is.na(x)]))}
BaseCosecha1m2$Sitio<-0
BaseCosecha1m2$Sitio<-summaryBy(BaseCosecha1m2$Pacela$ContadorParcelas +
BaseCosecha1m2$Pacela$Biomasa_gP1m2 ~ BaseCosecha1m2$Pacela$FolioSitio,
                                data=BaseCosecha1m2$Pacela,FUN=myfun_SitSum,keep.names=TRUE,
                                var.names=c("ai_P1m2","Biomasa_gP1m2"))
length(BaseCosecha1m2$Sitio$FolioSitio)
#####
#####Unión de las tablas "<7.5","7.5-20" y ">20" de datos a nivel de sitio#####
#Se filtran los NA de la base "BaseSitio"
BaseSitio<-BaseSitio[!(is.na(BaseSitio$folio)),]

```

```

length(BaseSitio$folio)
#Se crea una variable "folio-sitio"
BaseSitio$folio_sitio<-paste(BaseSitio$folio,"-",BaseSitio$sitio)
#Seunen las bases "BaseSitio"+"BaseArboladoDepSitioSum"
BaseSitioIntegrada<-0
BaseSitioIntegrada<-merge(BaseSitio, BaseArboladoSitioSum7.5, by.x = "folio_sitio", by.y = "folio_sitio",all=TRUE)
BaseSitioIntegrada<-merge(BaseSitioIntegrada, BaseArboladoSitioSum7.5_20, by.x = "folio_sitio", by.y =
"folio_sitio",all=TRUE)
BaseSitioIntegrada<-merge(BaseSitioIntegrada, BaseArboladoSitioSum20, by.x = "folio_sitio", by.y =
"folio_sitio",all=TRUE)
length(BaseSitioIntegrada$folio_sitio)
#Se imputan "0s" en los valores NA de "BaseSitioIntegrada"
BaseSMI<-BaseSitioIntegrada
BaseSMI[is.na(BaseSMI)]<-0
#Se agrega la base de 1m2
BaseSMI<-merge(BaseSMI, BaseCosecha1m2Sitio, by.x = "folio_sitio", by.y = "FolioSitio",all=TRUE)
#Se imputan 0 en la variable "Biomasa_gP1m2"
BaseSMI$Biomasa_gP1m2Dep<-
ifelse(is.na(BaseSMI$Biomasa_gP1m2) & BaseSMI$sitio==2,0,
ifelse(is.na(BaseSMI$Biomasa_gP1m2) & BaseSMI$sitio==3,0,
ifelse(is.na(BaseSMI$Biomasa_gP1m2) & BaseSMI$sitio==4,0,BaseSMI$Biomasa_gP1m2)))
#Se eliminan los sitios que están fuera del arreglo sistemático
BaseSMI=BaseSMI[BaseSMI$folio<=24,]
length(BaseSMI$folio)
#Imputación de áreas
BaseSMI$ai7.5<-0.008
BaseSMI$ai7.5_20<-0.04
BaseSMI$ai20<-ifelse(BaseSMI$sitio==1,0.1,0.04)
BaseSMI$ai_P1m2HAS<-ifelse(is.na(BaseSMI$Biomasa_gP1m2Dep),NA,2/1000)
#Se guarda la base a nivel de sitio
write.csv(BaseSMI, file = "BaseSitioSMI_atopixcofinal.csv")
#####
##Estimación de Factores de Emisión y sus incertidumbres
TablaEst7.5<-0
TablaEst7.5<-
ER(BaseSMI$CarbonoTotalSitio7.5/1000,BaseSMI$ai7.5,BaseSMI$densidadmuestreo,BaseSMI$folio,BaseAreas)
TablaEst7.5_20<-0
TablaEst7.5_20<-
ER(BaseSMI$CarbonoTotalSitio7.5_20/1000,BaseSMI$ai7.5_20,BaseSMI$densidadmuestreo,BaseSMI$folio,BaseAreas)
TablaEst20<-0
TablaEst20<-
ER(BaseSMI$CarbonoTotalSitio20/1000,BaseSMI$ai20,BaseSMI$densidadmuestreo,BaseSMI$folio,BaseAreas)
TablaEst1m2<-0
TablaEst1m2<-
ER(BaseSMI$Biomasa_gP1m2Dep/1000/1000*0.47,BaseSMI$ai_P1m2HAS,BaseSMI$densidadmuestreo,BaseSMI$folio,BaseAreas)
#Se unen las bases a nivel de estimaciones
TablaEstimacionesBA<-0
TablaEstimacionesBA<-data.frame(
Estrato=TablaEst7.5$Estrato,
NumSitios7.5=TablaEst7.5$NumSitios,
NumCong7.5=TablaEst7.5$NumCong,
ER7.5=TablaEst7.5$ER,

```

```

U7.5=TablaEst7.5$U,
NumSitios7.5_20=TablaEst7.5_20$NumSitios,
NumCong7.5_20=TablaEst7.5_20$NumCong,
ER7.5_20=TablaEst7.5_20$ER,
U7.5_20=TablaEst7.5_20$U,
NumSitios20=TablaEst20$NumSitios,
NumCong20=TablaEst20$NumCong,
ER20=TablaEst20$ER,
U20=TablaEst20$U,
ER1m2=TablaEst1m2$ER,
U1m2=TablaEst1m2$U)
#Se une la base de "Áreas"
TablaEstimacionesBA<-merge(BaseAreas,TablaEstimacionesBA,by.x="Estrato",by.y="Estrato")
TablaEstimacionesBA
#####
#####ESTIMACIÓN DE ALMACENES POR RANGO DIAM Y PROP DE INCERTIDUMBRES#####
#####
#####
#Se estiman los almacenes por estrato y se propaga la incertimbre
#Almacén por rango diamétrico <7.5
TablaEstimacionesBA$Stock7.5<-(TablaEstimacionesBA$ER7.5*TablaEstimacionesBA$AreaHas)
#Almacén por rango diamétrico <7.5-20
TablaEstimacionesBA$Stock7.5_20<-(TablaEstimacionesBA$ER7.5_20*TablaEstimacionesBA$AreaHas)
#Almacén por rango diamétrico <20
TablaEstimacionesBA$Stock20<-(TablaEstimacionesBA$ER20*TablaEstimacionesBA$AreaHas)
#Almacén por 1m2
TablaEstimacionesBA$Stock1m2<-(TablaEstimacionesBA$ER1m2*TablaEstimacionesBA$AreaHas)
#Se estima el Almacén total por rango diamétrico
TablaEstimacionesBA$StockTotal<-(TablaEstimacionesBA$Stock7.5 +
                                TablaEstimacionesBA$Stock7.5_20 +
                                TablaEstimacionesBA$Stock20+
                                TablaEstimacionesBA$Stock1m2)
TablaEstimacionesBA$U_StockTot<-
(
sqrt((TablaEstimacionesBA$Stock7.5 * TablaEstimacionesBA$U7.5)^2 +
(TablaEstimacionesBA$Stock7.5_20 * TablaEstimacionesBA$U7.5_20)^2 +
(TablaEstimacionesBA$Stock20 * TablaEstimacionesBA$U20)^2+
(TablaEstimacionesBA$Stock1m2 * TablaEstimacionesBA$U1m2)^2)/
abs(TablaEstimacionesBA$StockTotal)
)
TablaEstimacionesBA
write.csv(TablaEstimacionesBA, file = "TablaEstimacionesBA_atopixcofinal.csv")
#####
#Stock Total
StcokTot<-sum(TablaEstimacionesBA$StockTotal)
StcokTot
#Carbono promedio/ha
CarbPromSMI<-sum(TablaEstimacionesBA$StockTotal)/sum(TablaEstimacionesBA$AreaHas)
CarbPromSMI
#Incertidumbre almacén
U_Tot<-sqrt(sum(TablaEstimacionesBA$StockTotal*TablaEstimacionesBA$U_StockTot)^2)/
abs(sum(TablaEstimacionesBA$StockTotal))
U_Tot
#####FIN#####

```

## Anexo 2. Formato de campo para el registro de MLC finos, medianos y gruesos en el SMIC Hidalgo

SMIC: Hidalgo

Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Brigadista: \_\_\_\_\_

Capturista: \_\_\_\_\_

Midió: \_\_\_\_\_

CGL	Id "T" (1,2,3)*	Segmento "L" 1,2,3,4 **	Id Muestra (F, M y G)	Género y especie	Nombre común	Diámetro (cm)	Grado de Desc. (1 a 5) <u>Gruesos</u>	SD	HD	PEND. (%)	UTM X	UTM Y	OBS.

\* Se refiere al número de "T" dentro del conglomerado.

\*\* Segmento de cada "T" donde se obtuvo la muestra.



**Anexo 4. Formato de laboratorio para el registro de pesos secos (g) de las submuestras de las parcelas de 1 m<sup>2</sup>**  
SMIC:

Brigadista: \_\_\_\_\_

Capturista: \_\_\_\_\_

Formato N°: \_\_\_\_\_

Id_etiqueta del paquete	Fecha de ingreso a laboratorio	Peso seco del paquete (g)	Fracción de carbono del paquete

**Anexo 5. Formato de campo para el muestreo de suelo.**

HOJA 1/1

FECHA: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**SMIC: HIDALGO**

---



---

**Nombre del capturista:**

---

**Profundidad de muestreo (cm):**

---

No. Conglomerado	Sitio	ID_Muestra	Profundidad (cm)				Profundidad TOTAL (cm)	PSf TOTAL (g)	PSf SUBMUESTRA (g)	PPf TOTAL (g)	PPf SUBMUESTRA (g)	Volumen TOTAL (ml)	PRf (g)	Observaciones
			C1	C2	C3	C4								
	2													
	3													
	4													
	1	0-10												
	1	10-20												
	1	20-30												
	1	30-40												
	1	40-50												
	1	>50												

PS= Peso del suelo; PP= Peso de las piedras; PR=Peso de las raíces; f= fresco

## Anexo 6. Relación de conglomerados donde se establecerán las trampas de hojarasca y ensayos de descomposición de hojas.

Conglomerado	Anualidad	Edad	Trampas colocadas
1986	1986	27	12
1983	1983	30	12
2008	2008	5	12
1985	1985	28	12
1987	1987	26	12
1988	1988	25	12
2006	2006	7	12
1993	1993	20	12
1996	1996	17	12
1998	1998	15	12
19	1998	15	12
2001	2001	12	12
1999	1999	14	12
1997	1997	16	12
2005	2005	8	12
2004	2004	9	12
23	Bosque sin manejo	≈90	12
1982	1982	31	12
<b>Total de trampas</b>			<b>216</b>
<b>Total de conglomerados</b>			<b>18</b>





**Anexo 9. Formato de laboratorio para registrar información de los lotes de descomposición de ramas.**

**Ensayo de descomposición de ramas finas. Colecta Octubre 2014. SMIC Hidalgo**

CGL	Sitio	Pp	P1	P2	P3	PSfinal	Ql	P1	P2	P3	PSfinal	Qr	P1	P2	P3	PSfinal
23	2	4					2					1				
23	3	10					8					10				
23	4	14					15					15				
1982	2	4					3					5				
1982	3	12					10					8				
1982	4	17					17					17				
1985	2	5					3					4				
1985	3	12					11					12				
1985	4	14					16					18				

## Bibliografía

Aber, D.J. and C.T. Driscoll. 1997. Effects of land use, climate variation, and N deposition on N cycling and C storage in northern hardwood forests. *Global Biogeochemical Cycles* 11: 639-648.

Ángeles-Pérez, G., C. Wayson, R. Birdsey, R. Valdez-Lazalde, H.M. de los Santos-Posadas y F.O. Plascencia-Escalante. Sitio de monitoreo de flujos de CO<sub>2</sub> a largo plazo en bosques bajo manejo en el centro de México. In: F. Paz y R. Cuevas eds. *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis 2011*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Edo. de México. pp. 793-797.

Ángeles- Pérez, G. 1995. Efecto de la vegetación competidora en el desarrollo inicial de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 114 p.

Baker, T. T., W. H. Conner, B. G. Lockaby, J. A. Stanturf, and M. K. Burkner. 2001. Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in South Carolina. *Soil Science Society of American Journal* 65:545-556.

Berg, B., and R. Lakowsky. 2005. *Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover*. Academic Press Inc. Burlington. 448 p.

Bortolot J., Z. and R. H. Wynne. 2005. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59: 342-360.

Brown, J.K., 1974. *Handbook for inventorying downed woody material* (Gen.Tech. Rep. INT-16.). Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, UT: U.S. In: CONAFOR. 2012. *Inventario nacional forestal y de suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Re-muestreo 2012*.

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.

- Chi-Poot, R. A. 2007. Avifauna en bosques manejados de *Pinus patula* en la mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 75 p.
- Comisión Nacional Forestal. 2012. Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2012. SEMARNAT. México. 140 p.
- Comisión Nacional Forestal. 2012. Manual de procedimientos para el muestreo de campo. Re-muestreo 2012. <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/infys>
- Coomes, A.D., Allen B. R., Scott N.A., Goulding C., Beets P. 2002. Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *Forest Ecology and Management* 164: 89–108.
- Cruz, F. 2013. Plan de Manejo Forestal del Ejido Atopixco, Hidalgo.
- Cruz, M. Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Mexico. 39 p.
- Da- Lun, T., P. Yuan-Ying, Y. Wen-De, F. Xi, K. Wen-Xing, W. Guang-Jun., and C. Xiao-Yong. 2010. Effects of Thinning and Litter Fall Removal on Fine Root Production and Soil Organic Carbon Content in Masson Pine Plantations. *Pedosphere* 20(4):486–493.
- Eaton J. M., Lawrence D. 2006. Woody Debris stocks and fluxes during succession in a dry tropical forest. *Forest Ecology and Management* 232: 46-55
- Eissenstat, D. M., and R. D. Yanai. 2002. Root Life Span, Efficiency, and Turnover. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Eds. Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi. Marcel Dekker, New York, NY, p: 187–204.
- Enciclopedia de los municipios de México, EMM. 2000. Estado de Hidalgo: Zacualtipán de Ángeles.
- Hirobe, M., J. Sabang, B. K. Bhatta and H. Takeda. 2004. Leaf-litter decomposition of 15 tree species in a lowland tropical rain forest in Sarawak: decomposition rates and initial liter chemistry. *Journal of Forestry Research* 9: 341-346
- Hoover, M.C. 2008. Field measurements for forest carbon monitoring: a landscape-scale approach.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen adaptado para las Condiciones de la República Mexicana. 3ª Ed. Offset., Lario Ed. S.A. 252 p.

- Godínez I., O. 2007. Dinámica de la regeneración de *Fagus grandifolia* Ehrh subsp. *mexicana* (Martínez) E. Murray en La Mojonera, Zacualtipan, Hidalgo. Tesis de doctorado en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 94 p.
- Gómez D., J.D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la biosfera “sierra de Huautla”, Morelos, México. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 122 p.
- Gutiérrez-Vázquez, M. H., J. Méndez-González, C. Flores-López, J. A. Ramírez-Díaz y B. N. Gutiérrez-Vázquez. 2012. Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus cembroides* Zucc. en Coahuila, México. Rev. Fitotec. Mex. 35 (2): 123–133
- Hall S. A., I. C. Burke, D. O. Box, M. R. Kaufmann, and J. M. Stoker. 2005. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management* 208: 189-209.
- Hardy, C.C., R.E. Burgan y R.D. Ottmar. 2000. A Database for Spatial Assessments of Fire Characteristics, Fuel Profiles, and PM10 Emissions. *Journal of Sustainable Forestry* 11: 229-244.
- Harmon, M.E., Whigham F., Sexton J., Olmsted I. 1995. Descomposición and mass of woody detritus in the dry tropical forest of the Northeastern Yucatan Peninsula, Mexico in: *Biotropica* Volumen 27, N° 3 (Sep., 10995), 305-316.
- Hertel, D. and 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, T. Hishi, N. Makita, S. Fujii, and L. Finér. 2009. A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine root production in forest ecosystems. *Plant Root* 3: 6-31. doi:10.3117/plantroot.3.26
- Hirobe, M., J. Sabang, B. K. Bhatta and H. Takeda. 2004. Leaf-litter decomposition of 15 tree species in a lowland tropical rain forest in Sarawak: decomposition rates and initial liter chemistry. *Journal of Forestry Research* 9: 341-346
- Hollinger, D. 2008. Defining a Landscape-Scale Monitoring Tier for the North American Carbon Program. En: Hoover, C. (Ed.) *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Springer-NY, USA. pp 3-16.

- Hoover, C. (Ed.). 2008. Field Measurements for Forest Carbon Monitoring. Springer-NY, USA.
- INEGI. 1992. Síntesis geográfica del estado de Hidalgo. México. 134 p.
- IPCC, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4. Agriculture, forestry and other land use. Edited by Simmon Eggleston, Leandro Buen día, Kyoko Miwa, Todd Ngara and Kiyoto Tanabe.
- Jenny, H., S. P. Gessel and F. T. Bingham. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* 68: 419-432
- Kyung Y.T., Chung H., Kim H.R., Noh J.N., Seo W.K., Lee K.S., Jo W. y Son Y. Coarse woody debris mass dynamics in temperate natural forest of Mt. jumbong, Korea. In: *Journal of ecology and field biology* 34(1):115-125, 2011.
- Kurz WA, Dymond CC, White TM, Stinson G, Shaw CH, Rampley GJ, Smyth C, Simpson BN, Neilson ET, Trofymow JA, Metsaranta J, Apps MJ. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220(4): 480-504
- Lukac, M. 2012. Fine root turnover. En: *Measuring Roots: An Updated Approach*. Mancuso, S. ed. Springer, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, p:363–373.
- Makkonen, K., and H. S. Helmisaari. 1998. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 102:283-290.
- Marshall, P.L., Davis G., LeMay V.M., 2000. Using line intersect sampling for coarse woody Debris. Forest research technical report. Vancouver forest region. Forest Service British Columbia. 32 páginas
- Martínez Y. A., Sarukhán J. 1993. Cambios estacionales en el mantillo de un bosque tropical caducifolio y uno sub caducifolio en Chamela, Jalisco. *Acta botánica Mexicana*, abril, número 021. Instituto de ecología A.C. Patzcuáro, Michoacán. Páginas 1-6
- Martínez-Castillo, B. E., 2014. Descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* Schldl. & Cham. Y dinámica de la producción de hojarasca en un bosque manejado en el estado de Hidalgo. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de postgraduados. Postgrado Forestal. México. 103 p.

- Martínez-Morales, M. A. 2004. Nuevos registros de aves en el bosque mesófilo de montaña del noreste de Hidalgo, México. *Huitzil* 5(2):12-19.
- McGaughey, R. J. 2012. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. Forest Service. Pacific Northwest Research Station. United States Department of Agriculture. 171 p.
- M.C., Ordoñez, M.F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales- IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 162 p.
- Means, J. E., S. A. Acker, D. J. Harding, J. B. Blair, M. A. Lefsky, W. B. Cohen, M. E. Harmon, and W. A. McKee. 1999. Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon, *Remote Sensing of Environment* 67: 298-308.
- Metcalfe, D., P. Meir, L. E. O. C. Aragão, A. da Costa, S. Almeida, A. Braga, P. Golçalves, J. Athaydes, Y. Malhi, and M. Williams. 2008. Sample sizes for estimating key ecosystem characteristics in a tropical terra firme rainforest. *Forest Ecology and Management* 255:558-566.
- Morfin-Ríos, J.E., E.J. Jardel P., Alvarado C. y J.M. Michel-Fuentes. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 111 páginas.
- Navarro C. R. M., M. Sánchez, J. Gómez, A. García, R. Hernández, S. Lanjeri. 2010. Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice de superficie foliar 79 (LAI) en encinas [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.]. *Forest Systems* 19 (1) 61-69.
- Olguín A.M., Maldonado M.V., López M. D. 2012. Towards the use of forest carbon budget modeling tools to support MRV systems for REDD+ in Mexico. Ponencia. 6th Regional Workshop on Forest Monitoring-GEO FCT ND San José, Costa Rica, August 20-23, 2012
- Olson, J. S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 322-331
- Ordoñez P., C. 2009. Carbono en el suelo mineral en bosques manejados de *Pinus patula* Schiedde & Deppe. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 63 p.

- Osawa, A., and R. Aizawa. 2012. A new approach to estimate fine root production, mortality, and decomposition using litter bag experiments and soil core techniques. *Plant Soil* 355:167–181. doi: 10.1007/s11104-011-1090-6.
- Persson, H. 1980. Spatial distribution of fine-root growth, mortality and decomposition in a Young Scots pine stand in Central Sweden. *Oikos* 34:77-87.
- Persson, H. 2002. Root system in arboreal plants. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Eds. Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi. Marcel Dekker, New York, NY, p:187–204.
- Persson, H. Å., and I. Stadenberg. 2009. Spatial distribution of fine roots in boreal forests in eastern Sweden. *Plant Soil* 318:1–14.
- Ramírez-Correa, J. A., C. M. Zapata-Duque, J. D. León-Peláez y M. I. González-Hernández. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia*. 32 (5): 303-311
- Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe and P. Sollins. 1999. *Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research*. Oxford University Press. Oxford. 462 p.
- Rzedowski, R. J. y X. Madrigal-Sánchez. 1972. Excursión del centro al noreste: Itinerario Tampico – Zacualtipán. Congreso Latinoamericano de Botánica. Guías botánicas de excursiones en México. pp 237-242.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT® 9.3. User's Guide*. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- Santantonio, D. 1980. Seasonal dynamics of fine roots in mature stands of Douglas- fir of different water regimens A preliminary report. En: Riedacker, A., and J. Gagnaire-Michard (Eds.). *Symposium: Root physiology and symbiosis, Nancy (190–203p.)*. Seichamps, France: Centre Nationale de Recherches Forestières.
- Sikkink, P.G., Keane, R.E., 2008. A comparison of five sampling techniques to estimate surface fuel loading in montane forests. *Int. J. Wildland Fire* 17, 363-379.
- Smith, M. D. 1954 Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. Forests products laboratory. Forest Service U.S. Department of agriculture
- Soriano L., M.A. 2014. Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 95 p.

- Steingrobe, B., S. Harald, 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(15):143-151.
- Valencia Manzo, S., Vargas Hernández, J., 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera Bosques* 3, 81-87.
- Van Aardt, J., R. Wynne, and J. Scrivani. 2008. Lidar-based mapping of forest volume and biomass by taxonomic group using structurally homogenous segments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74: 1033–1044.
- Van Wagner, C.E. 1982. \_Practicak aspects of the line intersect method. Informatio report PI-X-12. Petawawa national forestry institute. Canadian forestry service. Chalk river, Ontario, Canada. 20 páginas
- Vera Gaxiola, F., 1980. Presentación de la técnica de intersecciones planares en un caso de inventario de residuos forestales en el campo experimental Zoquiapan, Mex. (Tesis de Ingeniero Agrónomo especialista en bosques).
- Vogt, K. A., D. J. Vogt, and 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., D. J. Vogt, P. A. Palmiotto, B. Boon, J. O’Hara, H. Asbjornsen. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant Soil* 187:159–219.
- Xiao, C. W., E. G. Sang, and R. Z. Wang. 2008. Fine root dynamics and turnover rate in an Asia white birch forest of Donglingshan Mountain, China. *Forest Ecology and Management* 255:765-773.
- Yepes A.P., Navarrete D.A., Duque A.J., Phillips J.F., Cabrera K.R., Álvarez, E., García,
- Waddell, K.L., 2002. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators* 1: 139-153.
- Walker, S.M., Pearson, T.R.H., Harris, N., MacDicken, K., and Brown, S. 2009. Procedimientos operativos estándar para la medición de carbón terrestre. Winrock International.

Woldendorp G., Keenan R. J., Barry S., Spencer R.D. 2004. Analysis of sampling methods for coarse woody debris. *Forest Ecology and management* 198: 133-148.