
MONITOREO COMUNITARIO SEMICUANTITATIVO: INTEGRACIÓN DE DATOS BLANDOS Y DUROS

SEMI-QUANTITATIVE COMMUNITY MONITORING: INTEGRATION OF SOFT AND HARD DATA

Fernando Paz-Pellat^{1‡}

¹Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, *Campus Montecillo*. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

[‡]Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

El uso del monitoreo comunitario forestal comunitario de los almacenes de carbono se ha promovido como un medio económico y preciso, comparable a los inventarios profesionales, que además promueve la gobernanza, empoderamiento y construcción de capacidades de las comunidades. El uso de información semicuantitativa, pareada con cuantitativa, permite un enfoque de monitoreo comunitario semicuantitativo, mediante el uso de información indirecta (datos blandos o cualitativos) en forma compatible con datos duros (cuantitativos), a través de probabilidades de clasificación. Se presentan protocolos de muestreos cuantitativos y semicuantitativos, los cuales se aplicaron a comunidades de la Región Sierra-Costa, ejemplificada por la comunidad Pakayal. Se discute la estimación e integración de datos duros y blandos, del área basal con mediciones directas y con la técnica de Bitterlich, así como del carbono orgánico del suelo a través de las componentes densidad aparente, concentración de carbono orgánico y fragmentos gruesos del suelo. Los muestreos se extienden para su uso en dispositivos móviles, para aplicaciones más precisas y rápidas.

Palabras clave: *probabilidades p_1 y p_2 ; muestreos de campo; comunidad Pakayal de Chiapas; área basal y técnica de Bitterlich; carbono orgánico del suelo; dispositivos móviles.*

ABSTRACT

The use of community forest monitoring of carbon stocks has been promoted as an inexpensive and accurate means comparable to professional inventories, which also promotes community governance, empowerment and capacity building. The use of semi-quantitative information, paired with quantitative, allows a semi-quantitative monitoring approach using indirect information (soft data) in a way that is compatible with hard data (quantitative) through classification probabilities. Quantitative and semi-quantitative sampling protocols are presented, which are applied to communities of the Sierra-Costa Region, particularly in the Pakayal community. The estimation, integration of hard and soft data, of the basal area with direct measurements and with the Bitterlich technique, as well as of soil organic carbon through the bulk density, organic carbon concentration and coarse soil fragments components, is discussed. Sampling is extended for use on mobile devices for faster and more accurate applications.

Keywords: *probabilities p_1 and p_2 ; field sampling; Pakayal community of Chiapas; basal area and Bitterlich technique; soil organic carbon; mobile devices.*

INTRODUCCIÓN

El mecanismo REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada más conservación e incremento de almacenes de carbono y manejo forestal sustentable) (Angelsen *et al.*, 2021) está orientado a la mitigación de gases efecto invernadero del sector forestal, bajo los auspicios de la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático, por lo que su implementación se ha promovido ampliamente. La implementación de un sistema de medición/monitoreo, reporte y verificación (MRV) de REDD+ (Climate Action Reserve, 2020; FAO, 2020; GOFC-GOLD, 2016; Hewson *et al.*, 2014; IPCC, 2003, 2006; VCS, 2020) es una tarea crítica.

La participación de las comunidades forestales en el sistema MRV se ha promovido como una opción potencial para la colecta de datos de calidad y menor costo (Hawthorne *et al.*, 2016; Skutsch, 2011). El monitoreo de la biomasa aérea, así como el monitoreo social y ambiental hecho por las comunidades, es comparable, en términos de precisión, al monitoreo por profesionales y de costos menores (Larrazábal *et al.*, 2012; Pratihast *et al.*, 2013b), aunque las mediciones de la degradación forestal y la utilización de los bosques son problemáticas (Danielsen *et al.*, 2011). La participación de los propietarios de los bosques en el monitoreo de sus propios recursos genera incentivos para su involucramiento con mejoras en la gobernanza, empoderamiento y construcción de capacidades (Larrazábal *et al.*, 2012; McCall *et al.*, 2016; Palmer-Fry, 2011; Skutsch *et al.*, 2014a), aun cuando se inducen sesgos en los monitoreos de parcelas permanentes por la tendencia a valorar positivamente las perturbaciones forestales (Danielsen *et al.*, 2011; Larrazábal *et al.*, 2012). La percepción de las comunidades como agentes de deforestación y degradación forestal y, por lo tanto, en conflictos de interés con el sistema MRV prevalece, aunque con poco soporte documental (Skutsch y Turnhout, 2020). El problema real de estos monitoreos está asociado al sistema de distribución de beneficios y los sesgos que induce (Skutsch *et al.*, 2014a), para resolverlo se ha propuesto que la distribución de beneficios se base en el monitoreo de actividades y no en resultados (Skutsch *et al.*, 2014b).

Para la participación de las comunidades en los sistemas MRV, McCall *et al.* (2016) sugieren una estrategia mejor, orientada a sistemas de mapeo, medición, monitoreo (MMM). Las mediciones

realizadas por las comunidades requieren validación por profesionales (auditoria) para analizar su calidad e incertidumbre (Danielsen *et al.*, 2011; Palmer-Fry, 2011; Pratihast *et al.*, 2013a). La revisión de la precisión y exactitud de las mediciones comunitarias ha verificado que son comprobables con las realizadas por profesionales (Hawthorne *et al.*, 2016), con mejores resultados sociales y ambientales, que se incrementan con la frecuencia de los muestreos (Brofeldt *et al.*, 2014).

La implementación del monitoreo comunitario forestal convencional se basa en la adopción de metodologías estándares de monitoreo profesional, con protocolos y guías asociadas (Brofeldt *et al.*, 2014; Pratihast *et al.*, 2013a; Skutsch, 2011), lo cual corresponde con la Categoría 2 (manejado externamente, con colectores locales) de la tipología de monitoreo discutida por Danielsen *et al.* (2009). Un sistema de monitoreo deseable es la Categoría 4 (monitoreo colaborativo, con interpretación local de datos), el cual requiere de enfoques alternativos de monitoreo y análisis de datos levantados por las comunidades.

El Programa Mexicano del Carbono ha experimentado con sistemas de monitoreo comunitarios desde el 2011 (PMC, 2011a, b, c; PMC, 2015), con resultados mixtos (Paz *et al.*, 2012; Rojas-García *et al.*, 2014), por lo que en este trabajo se analizan los resultados de los monitoreos comunitarios realizados en la Región Sierra-Costa de Chiapas, México, desde una perspectiva de integración de las incertidumbres de los datos de medición (Paz y de Jong, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreos cuantitativos

La metodología que se utilizó para mediciones profesionales de los almacenes de carbono en sitios forestales, se basó en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2009), con la finalidad de homologar la información local, con la disponible a nivel nacional.

El diseño del muestreo cuantitativo se muestra en la Figura 1, en donde se observan los sitios de muestreo descritos en el Cuadro 1, que detalla las variables medidas.

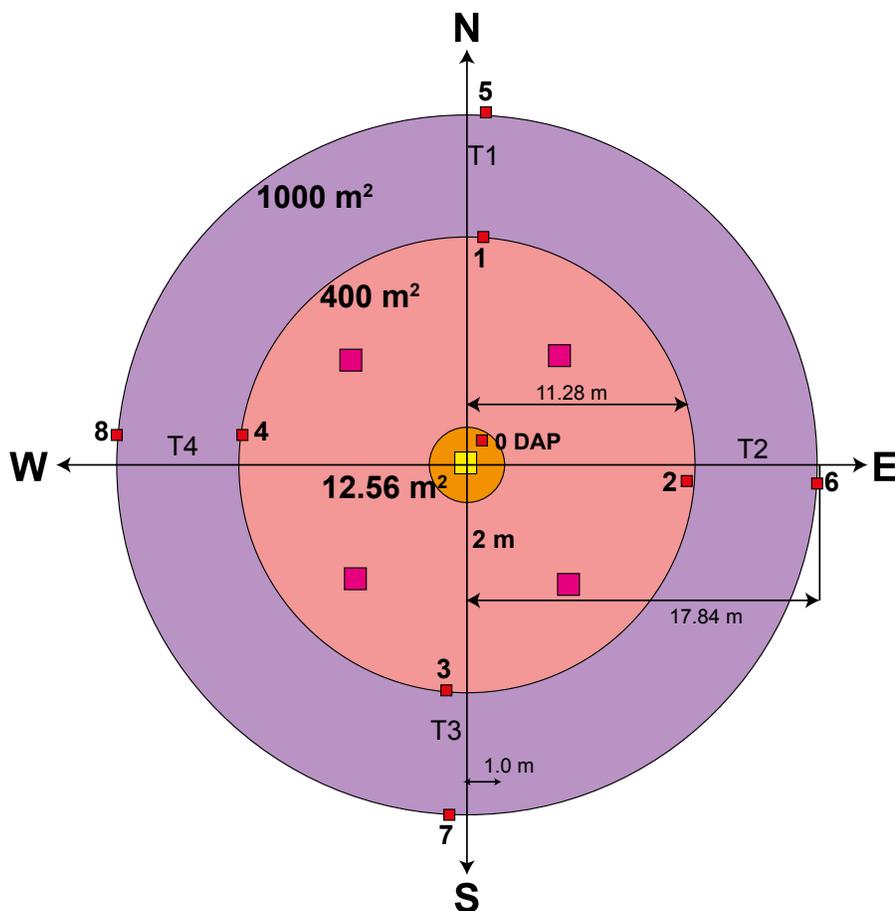
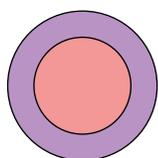
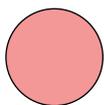


Figura 1. Diseño muestral cuantitativo.

Cuadro 1. Especificaciones de las unidades de muestreo.



Sólo en el espacio entre el círculo de 1000 m² (radio = 17.84 m) y el de 400 m² (área de color morado), se toma información de árboles con diámetro normal mayor a 20 cm, poniendo especial atención en que la forma de vida y porte de los individuos sea propia de un árbol.



Sitio de 400 m² (radio = 11.28 m) para medir árboles con diámetro normal mayor o igual a 7.5cm, poniendo especial atención en que la forma de vida y porte de los individuos sea propia de un árbol. Por ejemplo, debe diferenciarse un árbol que en su etapa joven tiene un crecimiento arbustivo (por ejemplo, un encino) de los arbustos típicos. En este sitio también se obtiene información de arbustos.



Subsitio de 12.56 m² (radio = 2m) para registrar renuevo: elementos con diámetro <7.5 cm y altura ≥ 50cm poniendo especial atención en que la forma de vida y porte de los individuos sea efectivamente de árboles o arbustos. Por ejemplo, un renuevo de *Quercus spp* que en esa etapa tiene un porte arbustivo, finalmente llegará a ser un árbol. En este sitio también se obtiene información de arbustos.

Cuadro 1. Especificaciones de las unidades de muestreo. (Continuación).

	Subsitio de 1 m ² (L = 1m) para el registro de hierbas, helechos, musgos y líquenes.
	Transectos de muestreo de 15m para registrar información de materia orgánica muerta sobre la superficie (combustibles).
	Puntos de registro de materia orgánica muerta sobre la superficie (combustibles).
	Puntos de registro de mantillo y suelo.
	Subsitio de 1 m ² (L = 1m), cuatro muestras en forma representativa, una por cuadrante, en donde se registra el estrato herbáceo con enfoque ganadero.

La parcela de muestreo, tiene subsitios de muestreo y transectos de medición como se muestra en la Figura 1 (PMC, 2011b).

En el espacio entre el círculo de 1000 m² y el de 400 m² se mide y registra sólo el arbolado cuyo diámetro normal (DN), a la altura de 1.3m sobre la superficie del suelo, sea igual o mayor a 20 cm (perímetro normal = 62.8 cm).

En el sitio de 400 m² (radio = 11.28 m) se mide y registra el arbolado cuyo diámetro normal (DN), a la altura de 1.3 m sobre la superficie del suelo, sea igual o mayor a 7.5 cm (perímetro normal = 23.6 cm) y se registran arbustos con alturas mayores o iguales a 1.0 m, de los cuales se obtienen la altura total y el diámetro de copa.

En el subsitio de 12.56 m², se mide y registra, por género, la frecuencia y algunas variables cualitativas del repoblado (regeneración natural), cuyas plantas o árboles pequeños tengan como mínimo 50cm de altura, hasta la altura que alcancen, siempre que su diámetro

normal sea menor a 7.5 cm (perímetro normal = 23.6 cm). En el caso de los arbustos (alturas menores de 1.0 m), se tomará la misma información que los renovos arbóreos: frecuencia de edades (alturas) del repoblado.

En el subsitio de 1 m², se miden las plantas herbáceas, helechos, musgos, líquenes y otras características de la superficie del suelo presentes en el estrato. En este subsitio de 1 m², ubicadas en cada cuadrante, se miden y consignan las plantas herbáceas de interés ganadero.

A partir del centro de referencia se realizan la evaluación de materia orgánica muerta sobre la superficie (combustibles), que consta de cuatro transectos de muestreo de 15 m de longitud, en donde se registran, a manera de barrido a lo largo del transecto, los siguientes datos: 1) Frecuencia de piezas leñosas interceptadas: en los últimos 5 m del transecto piezas de 1 h (de 0 a 0.5cm de diámetro), 10 h (de 0.5 a 2.5 cm de diámetro) y en todo el transecto las piezas de 100 h (de 2.5 a 7.5cm de diámetro); además, se registra y se mide el diámetro a las piezas leñosas de 1000 h

(mayores de 7.5cm); 2) Se toman dos fotografías sólo en los transectos 1 y 3, de afuera hacia el centro de la parcela de muestreo.

El muestreo de suelo y mantillo se realiza en los puntos ubicados en las intersecciones de cada transecto con las circunferencias de 400 m² y 1000 m², que corresponden a los puntos de color naranja marcados del 1 al 8 en la Figura 1. En cada una de las intersecciones, antes de obtener las muestras de mantillo y suelo, primero se obtendrán las fotografías a nadir, elevando la cámara aproximadamente a 1m de altura para el caso de los cuadros de 30cm de lado (1.5 m en el caso del cuadro de 1 m de lado con el objeto de detectar cobertura). Posteriormente se medirá el espesor del mantillo (capa de hojarasca y de fermentación). La medición del mantillo consiste en obtener una muestra compuesta de material orgánico (hojarasca y capa de fermentación). A partir de los puntos en los que se tomó la muestra de mantillo, se obtendrá una muestra compuesta de suelo, a una profundidad de 0 a 30 cm. Las muestras de suelo y mantillo se colectarán en puntos paralelos y a 50 cm de distancia de los transectos de muestreo de materia orgánica muerta sobre la superficie (combustibles).

Muestreos semicuantitativos

Los muestreos semicuantitativos realizados por las comunidades forestales son de tipo rápido (alrededor de 15 minutos) utilizando mediciones indirectas de las variables de los inventarios, orientados a una descripción general y detallada de los almacenes de carbono e información complementaria (PMC, 2011c). Se realizan entre 5 y 15 muestreos semicuantitativos, por cada muestreo cuantitativo, para obtener datos que permitan determinar la incertidumbre en los diferentes almacenes de carbono.

Los muestreos semicuantitativos se realizan en un área circular de 1000 m², en los mismos sitios en los que se realizaron los muestreos cuantitativos (muestreos pareados).

En los muestreos semicuantitativos se levanta información para caracterizar el sitio y los almacenes de carbono de bosques y selvas (PMC, 2011c):

- a) Localización del centro de la parcela de muestreo y toma de fotografías panorámicas.
- b) Descripción de la vegetación: comunidad y desarrollo vegetal. Diferenciación entre bosques y selvas.

- c) Descripción de la vegetación: estrato dominante. Definición del estrato dominante en la vegetación (arbóreo, arbóreo-arbustivo, arbustivo-arbóreo, arbustivo, herbáceo-arbustivo, herbáceo, ninguno).
- d) Descripción de la vegetación: forma de vida presente. Definición de las formas de vida presentes (árboles, arbustos, trepadoras, hierbas, pastos, epífitas).
- e) Descripción de la vegetación: fenología. Dominio de la caducidad del follaje (perennifolia, subperennifolia, subcaducifolia, caducifolia).
- f) Descripción de la vegetación: evidencias de disturbio. Definición de los tipos de disturbio observados (huella de incendio, tala, sobrepastoreo, leña, sustracción de especies, árboles dañados y muertos, plagas, otros).
- g) Descripción de la vegetación: uso forestal. Definición de los usos forestales en la parcela (maderable, artesanal, medicinal o comestible, látex o resina).
- h) Descripción de la vegetación: agricultura asociada. Tipo de agricultura asociada a la parcela (temporal, riego, humedad, nomadismo).
- i) Descripción de la vegetación: agroforestería. Definir práctica agroforestal en la parcela (cítricos, otros frutales, cacao, palma, café, otro).
- j) Descripción de la vegetación: erosión del suelo. Descripción del tipo de erosión del suelo dominante (erosión hídrica en cárcavas o surcos, erosión hídrica laminar, erosión eólica en pedestales, erosión eólica por tolvanera, barrido o deposición).
- k) Descripción de la vegetación: aspecto de pastos asociados. Definir su forma de crecimiento (cespitoso, amacollado, postrado-decumbente, mixto).

- l) Descripción de la vegetación: manejo del ganado. Tipo de manejo del ganado (extensivo, intensivo, mixto, cinegético).
- m) Descripción de la vegetación: tipo de ganado. Definición del tipo de ganado (bovino, caprino, ovino, porcino, equino, otro).
- n) Descripción de la vegetación: razas principales del ganado. Definición de las razas de ganado principales (cebú, Holstein, etc.).

En la descripción de la vegetación se incluyen mediciones de variables que caracterizan a la vegetación:

- o) Descripción de la vegetación: cobertura de los estratos. Con base en la altura de las plantas, se definen los estratos (arbóreo alto, arbóreo medio, arbóreo bajo, arbóreo muy bajo, arbustivo muy alto, arbustivo alto, arbustivo bajo, herbáceo) y se estima la cobertura aérea (ausente, menor de

10%, entre 10 y 40%, entre 40 y 75%, mayor de 75%).

- p) Descripción de la vegetación: clases diamétricas. Las clases diamétricas (menor de 5 cm, de 6 a 20 cm, de 21 a 40 cm, de 41 a 60 cm, de 61 a 80 cm, mayor de 80 cm) se caracterizan por una estimación de categorías de abundancia (ausentes, poco, medio, mucho, elevado), en donde cada categoría se define por un intervalo del número de individuos).

Además de la Descripción de la Vegetación, se caracteriza la Descripción de la Capa Superficial del Suelo, a través de variables directas o indirectas, asociadas a los almacenes de carbono:

- 1) Descripción de la capa superficial del suelo: mantillo. Con una regla se mide el espesor promedio de la hojarasca y capa de fermentación, con una estimación visual de su cobertura aérea en la parcela (Figura 2).

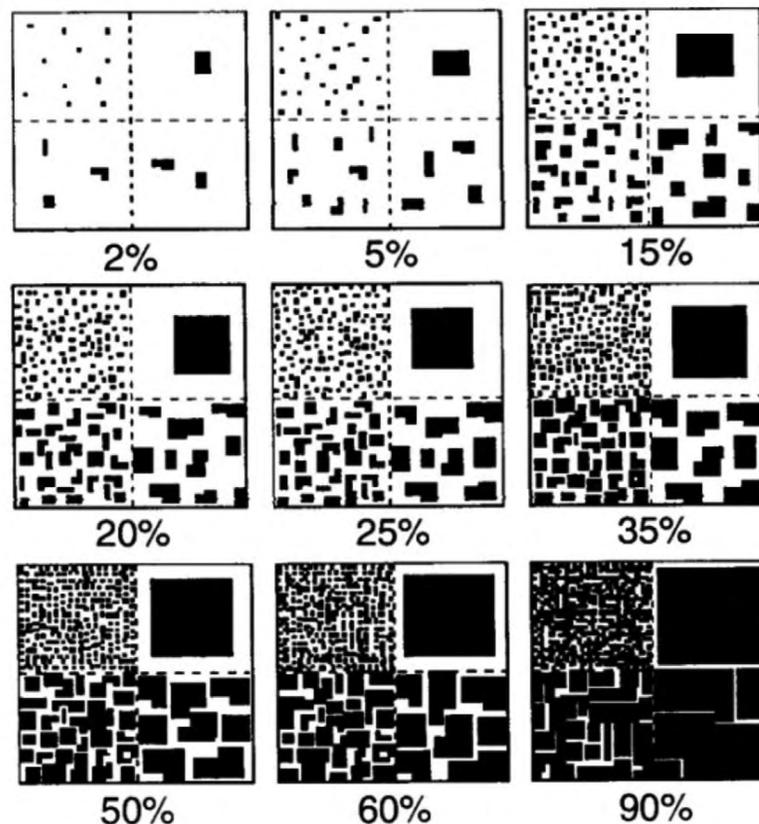


Figura 2. Guía para la estimación visual de la cobertura aérea del mantillo.

2) Descripción de la capa superficial del suelo: compactación del suelo. Con el uso de una pala se determina la resistencia a excavar, de acuerdo con las clases definidas:

Suelto. Cuando el suelo es arenoso, por ejemplo, no presenta resistencia a la penetración de la pala. No hay necesidad de algún esfuerzo para fracturar el agregado.

Firme. Cuando es mínima la resistencia ofrecida a la penetración. Normalmente con un solo empuje la pala queda enterrada hasta los primeros 30cm. El agregado seco se rompe fácilmente.

Duro. La pala puede ser enterrada, pero es difícil la maniobra y generalmente tiene que realizarse

en varias etapas antes de llegar a la profundidad indicada. El agregado seco se rompe únicamente con un esfuerzo manual notable.

Muy duro. La pala en ningún modo puede ser enterrada manualmente. En ocasiones la capa es tan dura que puede confundirse con un afloramiento rocoso. El agregado seco no se puede romper manualmente.

3) Descripción de la capa superficial del suelo: textura al tacto. Con el uso de una guía para la caracterización táctil de la textura del suelo (Cuadro 2) se define la clase textural.

Cuadro 2. Criterios para la determinación de la clase textural del suelo bajo condiciones de humedad.

Criterios		Clase textural	Contenido aproximado de arcilla (%)
<p>1. No es posible hacer un rollo de 7 mm (diámetro aproximado al de un lápiz).</p> <p>Arenosa. Cuando el suelo tiene gránulos relativamente grandes (mayores de 0.2 mm de diámetro), es muy pesado y con alta porosidad.</p>	<p>No se puede rayar con una navaja. No queda material fino entre los dedos. No es polvo.</p>	Arenosa	<5
			

Cuadro 2. Criterios para la determinación de la clase textural del suelo bajo condiciones de humedad. (Continuación).

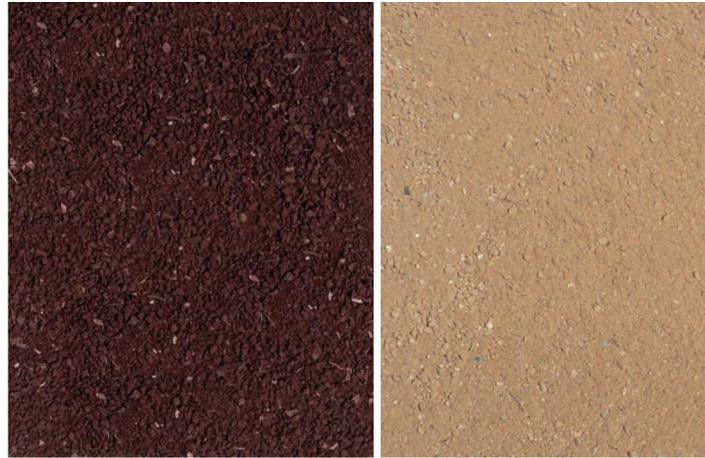
Criterios		Clase textural	Contenido aproximado de arcilla (%)
<p>2. Es posible hacer un rollo de 3-7mm (diámetro aproximado a la mitad del lápiz), pero se rompe al intentar doblarlo. Se adhiere a los dedos.</p>	<p>Moderadamente cohesivo. Ligeramente áspero y rugoso al frotarlo entre los dedos.</p>	Franca	8-27
	<p>Rugoso al frotarlo con los dedos. Moderadamente pegajoso, inclusive puede formarse una tira recta.</p>	Franco arenosa	20-35
<p>3. Posible de hacer un rollo de 3mm o menos y de hacer un aro de 3cm de diámetro. Cohesivo, pegajoso, se raya fácilmente con las uñas y se imprime bien la huella. Forma terrones fácilmente moldeables en húmedo, pero difíciles de romper en seco. Algunas arcillas son expandibles ya que al secarse pueden formar grietas.</p>	<p>Algunos gránulos se sienten al frotarse. Tiene alta plasticidad y adhesividad.</p>	Arcillosa	40-60
			

4) Descripción de la capa superficial del suelo: tono e intensidad del color en húmedo. Se describe la caracterización del tono (también llamado Hue o Matiz) e intensidad del color del suelo en estado húmedo. Los parámetros se generalizaron a partir del sistema de color Munsell (Cuadro 3). Se

consideran únicamente los tonos más frecuentes de suelo en México, sin embargo, algunos tonos que pueden existir en territorio nacional tales como: verde-azulados, amarillos y rosas pueden ser descritos adicionalmente.

Cuadro 3. Tonos e intensidades de color del suelo (pardo o café, rojo, gris, blanco y negro), de acuerdo con el sistema de color Munsell.

Tono pardo o café



Pardo o café oscuro

Pardo o café claro

Tono rojo



Rojo oscuro

Rojo claro

Cuadro 3. Tonos e intensidades de color del suelo (pardo o café, rojo, gris, blanco y negro), de acuerdo con el sistema de color Munsell. (Continuación).

Tono gris



Gris oscuro



Gris claro

Tono blanco y negro



Blanco



Negro

5) Descripción de la capa superficial del suelo: pedregosidad interna. La pedregosidad interna (profundidad de 30cm) del suelo se define por los fragmentos gruesos (> 2mm) existentes, los

cuales se encuentran en categorías de volúmenes (Cuadro 4), mismos que se estiman visualmente, de acuerdo con la Figura 3.

Cuadro 4. Categorías de pedregosidad interna del suelo.

				
1. Escaso o nulo. Contiene menos del 5% del volumen de suelo.	2. Leve. Contiene de 6 al 15% del volumen de suelo.	3. Moderado. Contiene de 16 a 40% del volumen de suelo.	4. Fuerte. Contiene de 41 a 80% del volumen de suelo.	5. Excesivo. Contiene más de 80% del volumen de suelo.

6) Descripción de la capa superficial del suelo: pedregosidad superficial. La pedregosidad superficial o afloramientos rocosos se categoriza en clases similares a la pedregosidad interna, mediante el uso de guías visuales.

Además de las descripciones anteriores, se incluyen las principales especies de árboles, arbustos y herbáceas, así como sus características (intervalos de altura).

Para definir tendencias temporales de los cambios en los almacenes de carbono de los bosques y selvas, se

caracterizan sus procesos (conservación, degradación, regeneración), además de la historia (uso previo) de los cambios en la parcela (fecha y tipo de cambio).

Relascopio de Bitterlich

Para estimar el área basal de los árboles en la parcela se utiliza el relascopio de Bitterlich (Romahn de la Vega, 1999), tal como se muestra en la Figura 3.

El uso del relascopio se implementa en cuatro puntos distribuidos sobre la parcela (Figura 4), en donde sobre el centro, punto 1, se realiza un conteo adicional, acotado a un área de 1000 m².

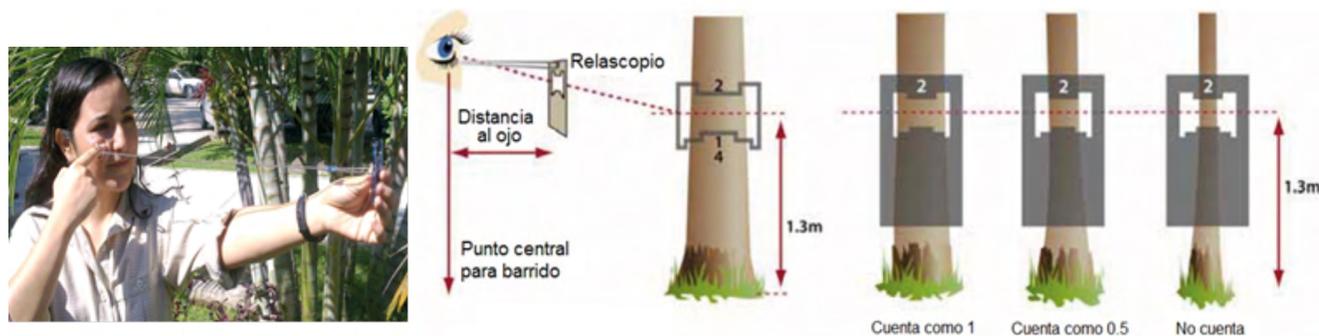


Figura 3. Uso del relascopio de Bitterlich y conteo de árboles para un factor de área basal (K) de 2.

Distribución de los 4 puntos para el conteo de árboles

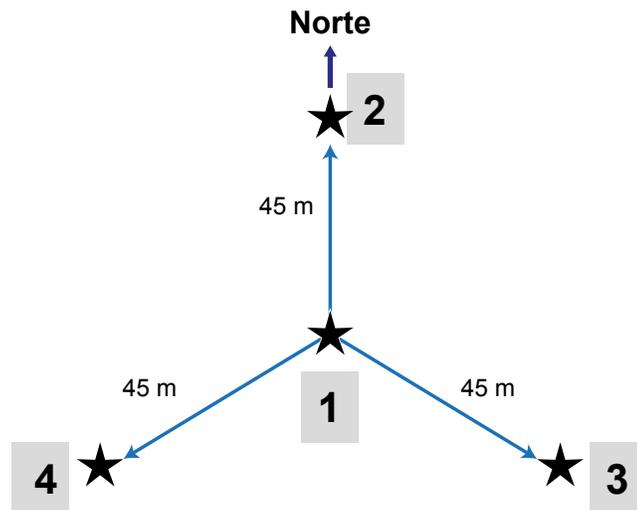


Figura 4. Posicionamiento de los conteos de árboles con el relascopio de Bitterlich.

Los factores de área basal (K) que se utilizan son 0.5, 1 y 2; el adecuado corresponde con el número de árboles que se cuentan (Kershaw *et al.*, 2016).

Conteo de materia muerta mayor o igual a 7.5cm

Para una estimación de la materia muerta sobre la superficie (material caído leñoso o combustibles) se realizan conteos sobre los transectos 1 a 2, 1 a 3 y 1 a 4 de la Figura 5, de piezas mayores o iguales a 7.5cm de diámetro sobre la superficie del suelo del material leñoso caído, describiendo el grado de putrefacción de la materia muerta, de la siguiente manera: corteza

intacta, con hojas y ramas finas presentes; corteza intacta, con ramas finas presentes, pero sin hojas; la corteza se empieza a pudrir y no hay hojas; la corteza está separada, la mayor parte podrida y no hay hojas; completamente podrida la corteza, sin hojas y las ramas son separables.

Representatividad espacial

Finalmente, se caracteriza la representatividad espacial de la parcela de muestreo, tal como se muestra en la Figura 5.

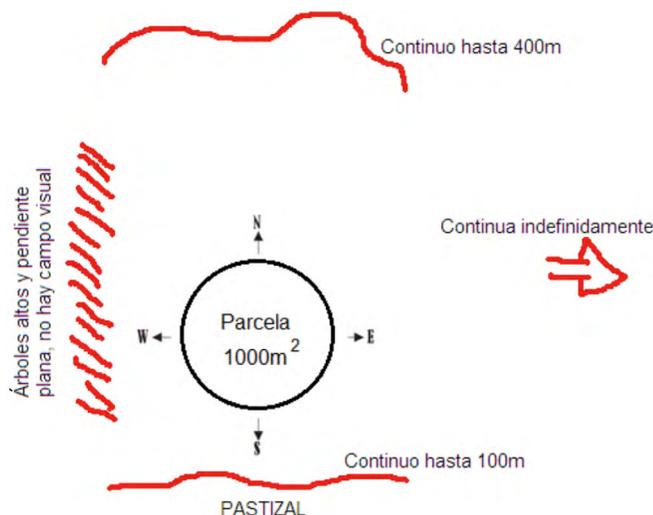


Figura 5. Ejemplo de la representación espacial de la parcela de muestreo.

Muestras pareados y estimaciones integrando datos duros y blandos

Para codificar la información de la función acumulada de probabilidad es posible usar las variables indicadoras (Journel, 1983), asociadas al muestreo cuantitativo:

$$I(x; z_c) = P(Z(x) \leq z_c | Z(x)) = \begin{cases} 1, Z(x) \leq z_c \\ 0, Z(x) > z_c \end{cases} \quad (1)$$

El momento de orden uno de la variable indicadora es:

$$E[I(x; z_c)] = P[Z(x) \leq z_c] = F(z_c) \quad (2)$$

donde $F(z_c)$ es la distribución de probabilidad acumulada.

Para definir la calidad de la variable indirecta \hat{Z} (muestreo semicuantitativo) es necesario definir las métricas del error de una mala clasificación (Alabert, 1987):

$$p_1 = P(\hat{Z}(x) \leq z_c | Z(x) \leq z_c) \quad (3)$$

$$p_2 = P(\hat{Z}(x) \leq z_c | Z(x) > z_c) \quad (4)$$

Una variable indirecta \hat{Z} se considera de buena calidad si $p_1 \rightarrow 1$ $p_2 \rightarrow 0$. En el caso de $p_1 = p_2$ la variable \hat{Z} no contiene información.

Las probabilidades de mala clasificación pueden estimarse usando datos de calibración entre variables duras (datos cuantitativos) y blandas (datos semicuantitativos) (Figura 6), lo que permite establecer métricas de incertidumbre para la fusión de información.

La estimación de las probabilidades de la función indicador de verosimilitud está definida por el número de puntos que caen dentro de cada región (Alabert, 1983):

$$p_1(z_c) = \frac{A}{A+D} \quad (5)$$

$$p_2(z_c) = \frac{B}{B+C} \quad (6)$$

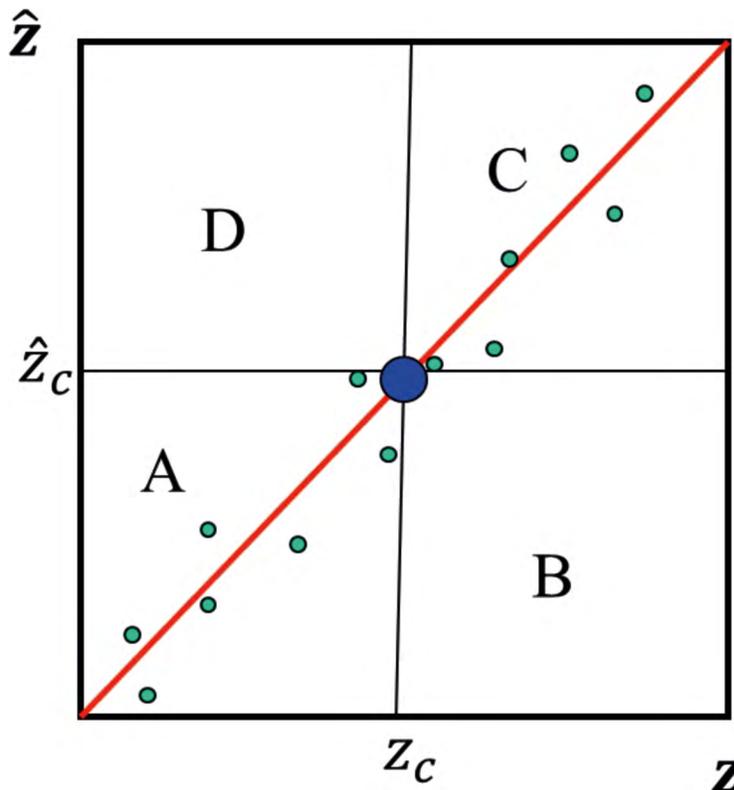


Figura 6. Relación entre la variable dura (Z) y la blanda (\hat{Z}) para estimar las probabilidades de mala clasificación.

En el caso de intervalos asociados a las variables, la Figura 7 muestra el uso de la relación entre la variable dura y la blanda.

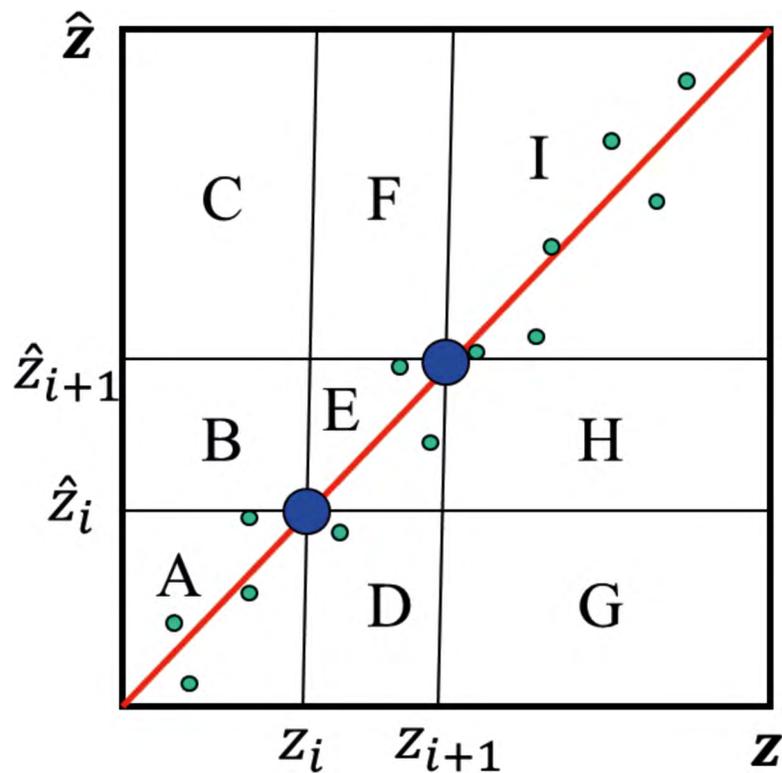


Figura 7. Relación entre la variable dura y la blanda, caso de clases.

De la Figura 7, las probabilidades de clasificación pueden estimarse (Wingle y Poeter, 1998) de:

$$p_1 = \frac{E}{D + E + F} \quad (7)$$

$$p_2 = \frac{B+H}{A+B+C+G+H+I} \quad (8)$$

Los tipos de datos, sus formas y medidas de incertidumbre, se muestran en el Cuadro 5. En el caso del rango de valores, se desconocen sus valores dentro del intervalo, lo cual no es equivalente a una distribución de probabilidad uniforme. El uso de valores arriba o debajo de un umbral permite establecer

las condiciones a cumplir por las estimaciones de datos. El uso de métricas de incertidumbre de los datos indirectos establece criterios de la calidad de la información. Finalmente, el uso de distribuciones de probabilidad permite utilizar el conocimiento *a priori* de la información.

La codificación de los datos duros y blandos sigue reglas simples de cumplimiento de los límites establecidos (Alabert, 1987; Goovaerts, 1997; Wingle *et al.*, 1998; Zhu and Journel, 1993).

Un primer paso consiste en definir los intervalos de la variable para poder codificar (vector de información) los diferentes tipos de datos en $N_c + 1$ intervalos. La Figura 8 muestra la codificación de los distintos tipos de datos definidos en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Tipos de datos, su formato y medidas de incertidumbre.

Tipo de Datos	Categoría Datos	Formato	Medida de incertidumbre
Duro		Valor único de $z(x)$	Sin incertidumbre en $z(x)$
	Tipo A	Valor único impreciso $\hat{z}(x)$	Índice de calidad
	Tipo B1	$[z_{min}, z_{max}]$ $z_{min} \leq z(x) \leq z_{max}$	Anchura del intervalo
Blando	Tipo B2	$z(x) \leq z_{max}$	Límite superior
	Tipo B3	$z(x) \geq z_{min}$	Límite inferior
	Tipo C	Distribución de probabilidad	Distribución de probabilidad

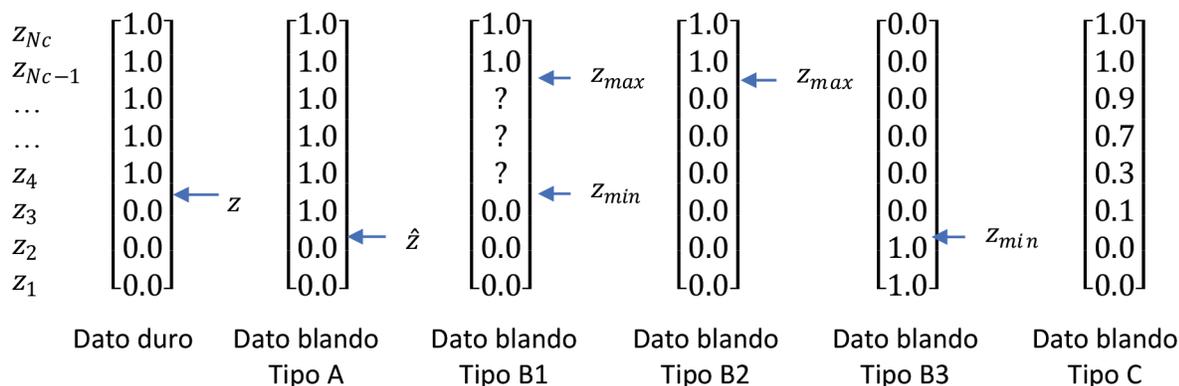


Figura 8. Codificación de los distintos tipos de datos. La posición de la flecha define el valor o valores umbral utilizados.

Con el uso de datos duros (Nh) y datos blandos (Ns), * se utiliza para connotar estimaciones) de: la estimación de $F(z_k)$ puede realizarse (el superíndice

$$F^*(z_k) = \omega \left[\sum_{\alpha=1}^{Nh} v_{\alpha} i(x_{\alpha}; z_k) \right] + (1 - \omega) \left[\sum_{\beta=1}^{Ns} \lambda_{\beta} \frac{i(x_{\beta}; z_k) - p_2^*(x_{\beta}; z_k)}{p_1^*(x_{\beta}; z_k) - p_2^*(x_{\beta}; z_k)} \right] \quad (9)$$

con:

$$\omega = \frac{Nh}{Nh + Ns} \quad (10)$$

Los pesos ν_α y λ_β pueden establecerse como equivalentes a $\frac{1}{N_h}$ y $\frac{1}{N_s}$, respectivamente. Para el caso donde los datos están agrupados espacialmente, es necesario utilizar técnicas que reduzcan la influencia de estos datos, por lo que se puede utilizar la técnica de desagrupamiento de celdas (Journel, 1983).

Datos cuantitativos (duros) y semicuantitativos (blandos) de estimación

Con el objetivo de mostrar ejemplos de la integración de datos duros y blandos se consideran las estimaciones de la biomasa aérea usando el área basal

de los árboles y el carbono orgánico de los suelos, de acuerdo con los protocolos de muestreo cuantitativo o datos duros (PMC, 2011b) y muestreo semicuantitativo o datos blandos (PMC, 2011c).

Para el caso de datos cuantitativos para estimar la biomasa aérea y carbono, las estimaciones se realizan con relaciones alométricas generales, relacionadas con el diámetro normal D_n (de Jong *et al.*, 2010), o específicas, relacionadas con el diámetro normal y la altura total (Rojas-García *et al.*, 2015). El uso de relaciones alométricas establece una relación del tipo de vegetación con el área basal (AB) en la parcela de muestreo (Figura 9).

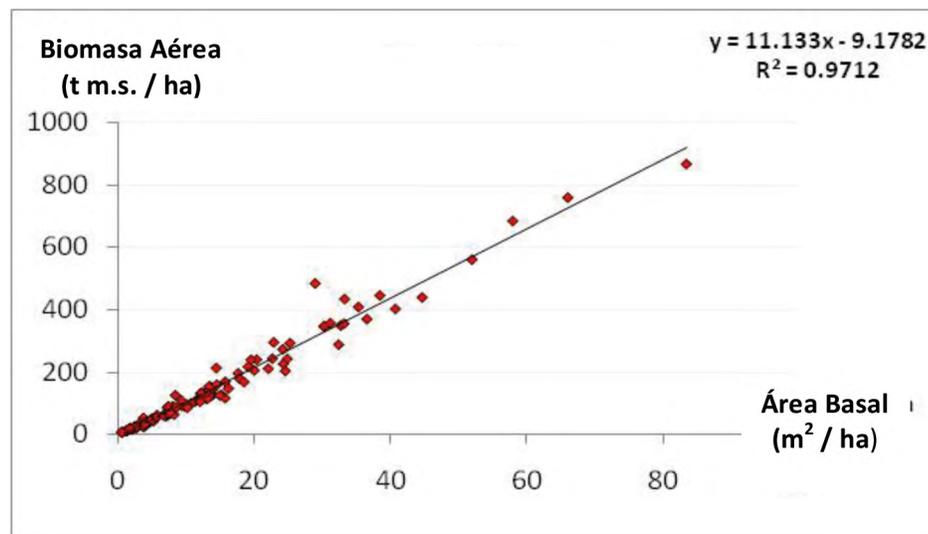


Figura 9. Relación entre el área basal ($m^2 ha^{-1}$) y la biomasa aérea (t de materia seca / ha) de los bosques mesófilos de montaña de Chiapas, con datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal.

Para los datos semicuantitativos, con el uso de la técnica de Bitterlich, el área basal se estima de:

$$G = (FAB)(Conteo) \quad (11)$$

donde el área basal G está en $m^2 ha^{-1}$, FAB es el factor de área basal (K) y $Conteo$ se refiere al número de árboles contados asociados a K , Figura 3.

Para la estimación del almacén del carbono orgánico del suelo (COS) se requiere conocer la fracción de fragmentos gruesos ($> 2mm$) o FG del suelo, ya que se introducen errores en las estimaciones al no considerarlos (Mehler *et al.*, 2014; Poeplau *et al.*, 2017; Poesen y Lavee, 1994; Rytter, 2012). Los datos de FG son escasos en las bases de datos de COS disponibles (Kern, 1995), por lo que se requiere su

evaluación en campo o laboratorio para realizar las correcciones correspondientes.

La estimación del almacén COS puede realizarse por (Poeplau *et al.*, 2017):

$$COS = CO_{ff}DA(1 - FG)P \quad (12)$$

donde el COS está en $Mg C ha^{-1}$, CO_{ff} es la concentración (%) de carbono orgánico en la fracción fina del suelo ($\leq 2mm$), DA es la densidad aparente del suelo ($g cm^{-3}$), P es la profundidad del suelo (cm) y FG es la fracción (0-1) de fragmentos gruesos en el suelo (en masa). En muchas aplicaciones (Bautista *et al.*, 2016; Poeplau *et al.*, 2017) se utiliza FG como fracción en volumen, lo cual conduce a errores de estimación, aun cuando es posible realizar conversiones de estimaciones

volumétricas a las de masa, usando la densidad de las partículas minerales (2.7 g cm⁻³). Mehler *et al.* (2014) han señalado que el uso de una densidad constante de las partículas minerales conduce a errores de estimación, ya que la densidad varía en función del intemperismo y porosidad de los suelos (Poesen y Lavee, 1994).

Para los datos semicuantitativos o blandos, la relación (10) se utiliza con FG en términos volumétricos, estimada visualmente con el uso de cuadros guía (Folk, 1951), tal como se discute en Bautista *et al.* (2016). La densidad aparente del suelo puede realizarse con estimaciones usando el cuadro guía (Cuadro 6) de FAO (2009). Las descripciones que se definen en el Cuadro 6, se adaptaron a las clases de compactación usadas en el muestreo semicuantitativo (PMC, 2011c).

Para realizar las estimaciones de CO_{ff} , es posible usar las tablas de color de Munsell (valor y matiz), dado que se han establecido relaciones empíricas (Fernández *et al.*, 1988; Franzmeier, 1988; Konen *et al.*, 2003; Schulze *et al.*, 1993; Steinhardt y Franzmeier, 1979; Wills *et al.*, 2007), que son dependientes de la humedad del suelo (Fernández *et al.*, 1988; Konen *et al.*, 2003) y su textura (Franzmeier, 1988; Schulze *et al.*, 1993; Steinhardt y Franzmeier, 1979). Las guías elaboradas por la FAO (2009), (Cuadro 7), se usaron como base para establecer relaciones entre el estado de humedad, la textura y el sistema de Munsell, de acuerdo con las clases definidas de textura y colores del muestreo semicuantitativo (PMC, 2011c).

Cuadro 6. Guías para estimación de la densidad aparente del suelo.

Observación	Forma frecuente del ped	Densidad aparente (kg dm ⁻³) Código
Suelos arenosos, limosos y francos con bajo contenido de arcilla		
Muchos poros, materiales húmedos se sueltan rápidamente de la barrena; materiales con poros vesiculares, suelos minerales con propiedades ándicas.	Granular	< 0,9 BD1
La muestra se desintegra al momento del muestreo, muchos poros visibles en la pared del perfil.	Granos simples, granular	0,9–1,2 BD1
La muestra se desintegra en fragmentos después de la aplicación de fuerza leve.	Granos simples, subangular, bloque angular	1,2–1,4 BD2
El cuchillo puede introducirse en el suelo húmedo con poca fuerza; la muestra se desintegra en pocos fragmentos, los cuales pueden aún dividirse.	Bloques angulares y subangulares, prismática, laminar	1,4–1,6 BD3
El cuchillo penetra solo 1-2 cm dentro el suelo húmedo, se requiere algo de esfuerzo, la muestra se desintegra en pocos fragmentos, los cuales no pueden ser sub-divididos.	Prismática, laminar y bloque angular	1,6–1,8 BD4
Se requiere de gran fuerza para introducir el cuchillo dentro del suelo, la muestra no puede ser desintegrada posteriormente.	Prismática	> 1,8 BD5

Cuadro 6. Guías para estimación de la densidad aparente del suelo. (Continuación).

Observación	Forma frecuente del ped	Densidad aparente (kg dm ⁻³) Código
Suelos francos con alto contenido de arcilla, suelos arcillosos		
Cuando se la deja caer, la muestra se desintegra en numerosos fragmentos, desintegración posterior de subfragmentos después de la aplicación de fuerza leve.	Bloques angulares	1,0–1,2 BD1
Cuando se la deja caer, la muestra se desintegra en pocos fragmentos, desintegración posterior de subfragmentos después de la aplicación de fuerza media.	Bloques angulares, prismática, laminar, columnar	1,2–1,4 BD2
Cuando se la deja caer, la muestra se mantiene mayormente intacta, mayor desintegración es posible si se aplica una gran fuerza.	Coherente, prismática, laminar (columnar, bloques angulares, laminar, forma de cuña)	1,4–1,6 BD3
Cuando se la deja caer, la muestra se mantiene intacta, no se puede lograr mayor desintegración aun si se aplica una muy gran fuerza.	Coherente (prismática, columnar, forma de cuña)	>1,6 BD4, 5

Nota: Si la materia orgánica es >2%, la densidad aparente debe ser reducida por 0.03 kg dm⁻³ por cada 1% de incremento en el contenido de la materia orgánica.

Cuadro 7. Estimación del contenido de materia orgánica, con base en el color del suelo de la tabla Munsell.

Color	Valor Munsell	Suelo húmedo		Suelo seco	
		A	AF, FA, F	A	AF, FA, F
			FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y		FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y
				(%)	
Gris claro	7			< 0.3	< 0.5 < 0.6
Gris claro	6.5			0.3–0.6	0.5–0.8 0.6–1.2
Gris	6			0.6–1	0.8–1.2 1.2–2

Cuadro 7. Estimación del contenido de materia orgánica, con base en el color del suelo de la tabla Munsell. (Continuación).

Color	Valor Munsell	Suelo húmedo			Suelo seco		
		A	AF, FA, F	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y	A	AF, FA, F	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y
		(%)					
Gris	5.5			< 0.3	1–1.5	1.2–2	2–3
Gris	5	< 0.3	< 0.4	0.3–0.6	1.5–2	2–4	3–4
Gris oscuro	4.5	0.3–0.6	0.4–0.6	0.6–0.9	2–3	4–6	4–6
Gris oscuro	4	0.6–0.9	0.6–1	0.9–1.5	3–5	6–9	6–9
Gris negro	3.5	0.9–1.5	1–2	1.5–3	5–8	9–15	9–15
Gris negro	3	1.5–3	2–4	3–5	8–12	> 15	> 15
Negro	2.5	3–6	> 4	> 5	> 12		
Negro	2	> 6					

Nota: Si el croma está entre 3.5-6, adicionar 0.5 al valor; si el croma es > 6, adicionar 1.0 al valor.

En el caso de las estimaciones pareadas entre datos cuantitativos y semicuantitativos del COS, no se realizaron correcciones por fragmentos gruesos.

Parcelas de muestreo en la Región Sierra-Costa de Chiapas, México

En el año 2011, el Programa Mexicano del Carbono (PMC) organizó una campaña de muestreos, cuantitativos y semicuantitativos, como prueba de concepto del esquema de monitoreo comunitario (Paz *et al.*, 2012) en la Región Sierra-Costa de Chiapas, México. La Figura 10 muestra la localización de las comunidades donde se realizaron los muestreos.

Las seis comunidades consideradas y las estimaciones de los almacenes de carbono, se

documentan en Rojas-García *et al.* (2014), aunque para algunas de ellas no hay información completa o muestreos cuantitativos suficientes para el análisis pareado (datos duros). Las estimaciones que se muestran en el documento previamente mencionado, utilizan otro esquema de estimación que difiere de la integración de datos duros y blandos (Paz y de Jong, 2012).

La comunidad Pakayal cuenta con 10 muestreos cuantitativos pareados con 10 muestreos semicuantitativos, más un número suficiente de muestreos semicuantitativos adicionales. La Figura 11 muestran la localización de la comunidad y la distribución de muestreos. La Figura 12 muestra la distribución de los usos de suelo y vegetación en la comunidad.

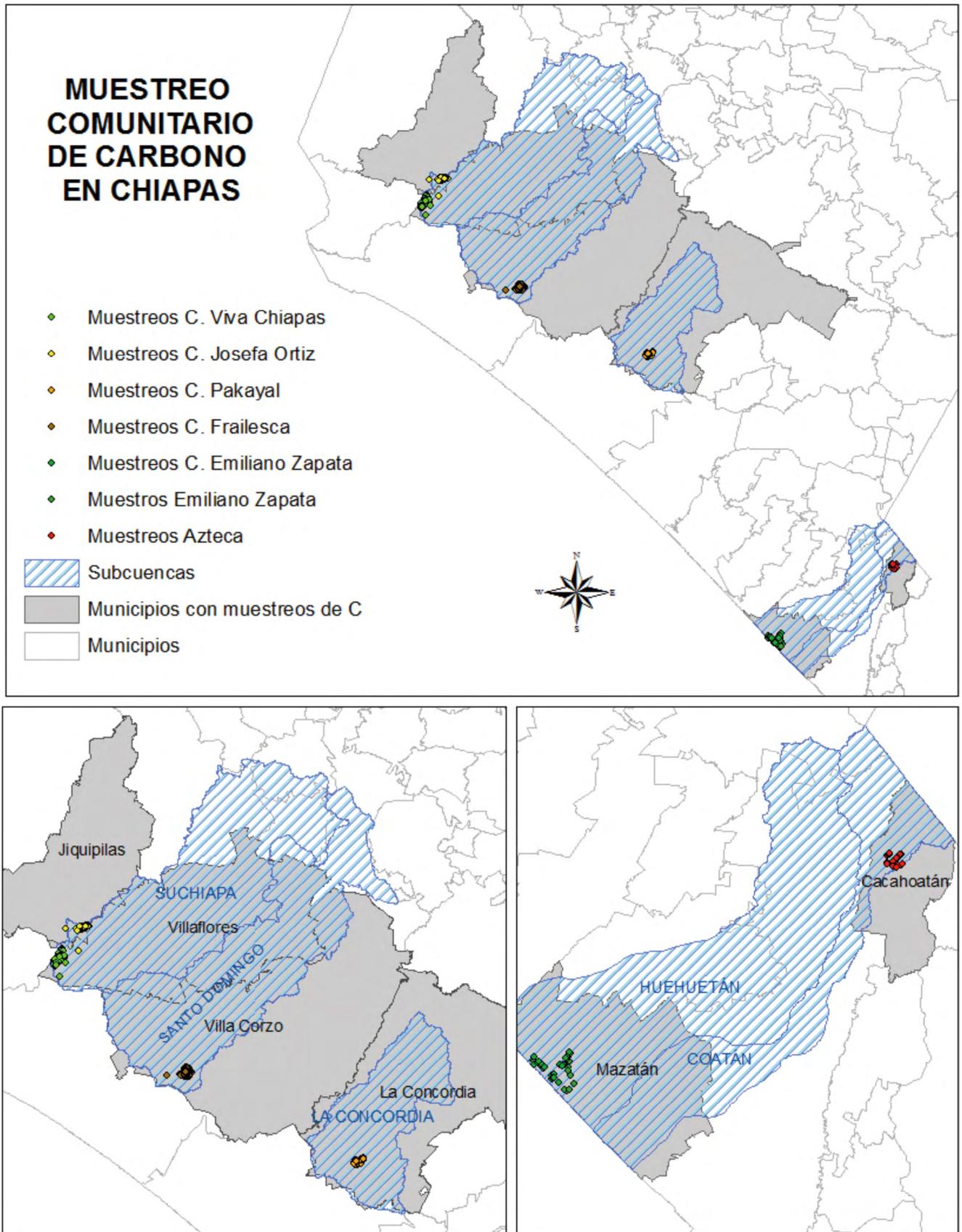


Figura 10. Ubicación general de los sitios de muestreo de carbono en Chiapas.

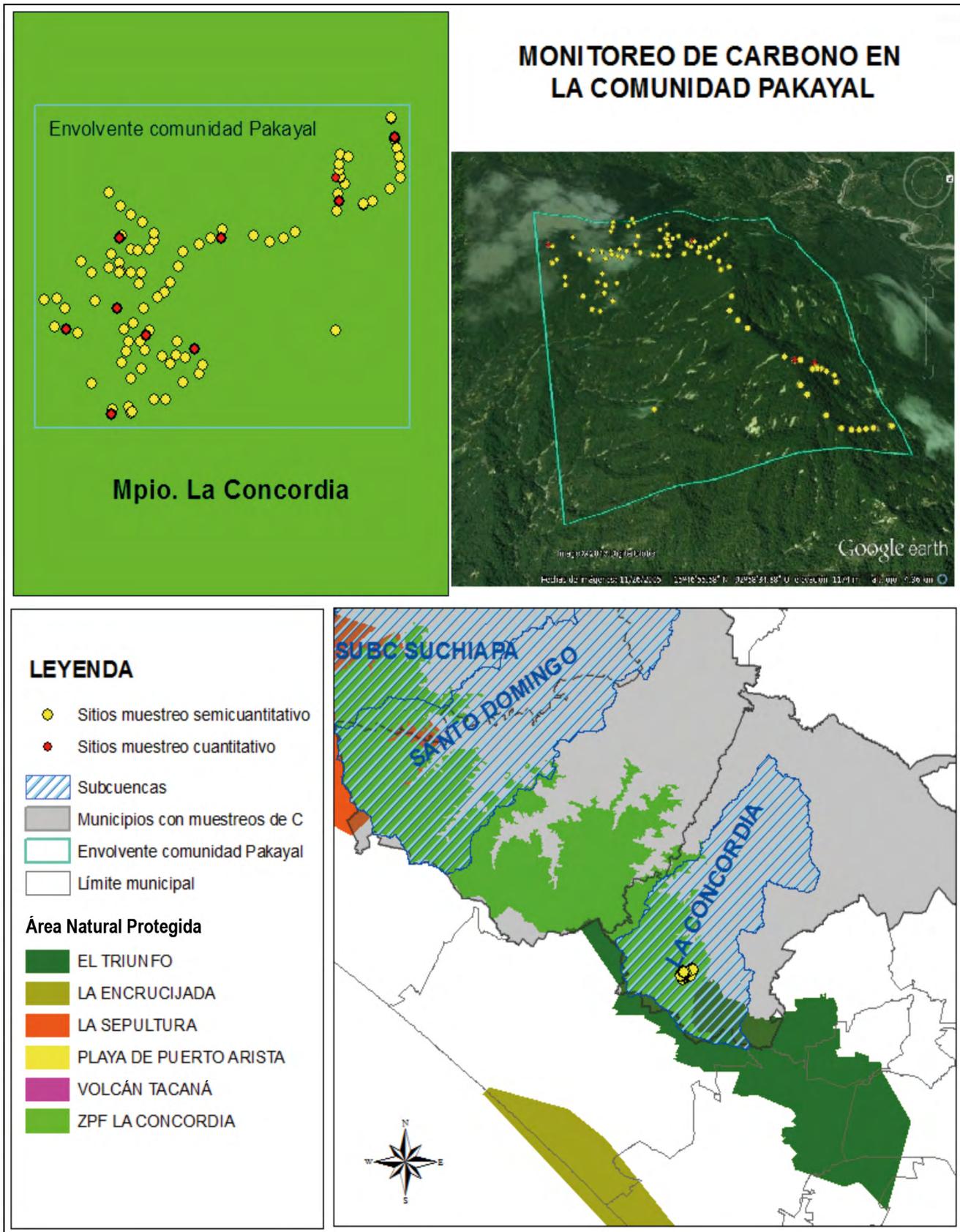


Figura 11. Sitios de monitoreo de carbono en la comunidad Pakayal.

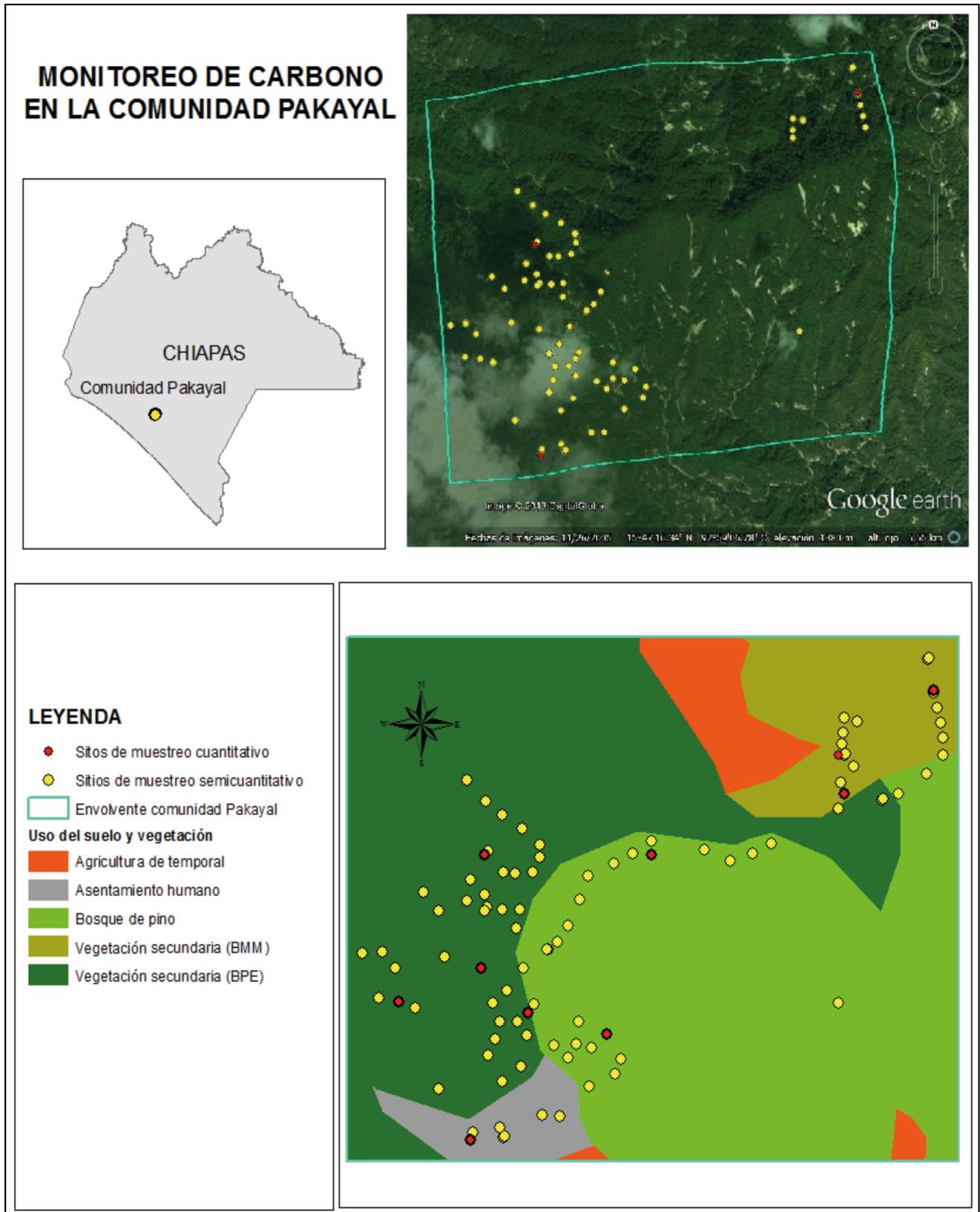


Figura 12. Uso del suelo y vegetación en los sitios de monitoreo de carbono de la comunidad Pakayal.

RESULTADOS

Estimación del área basal

Para estimar la biomasa aérea de las parcelas de muestreo cuantitativas se pueden utilizar relaciones alométricas (de Jong *et al.*, 2010; Rojas-García *et al.*, 2015) o las relaciones G-Biomasa aérea, tal como se muestra en la Figura 9. Si se considera que el tipo de

vegetación predominante en la comunidad Pakayal es el bosque mesófilo de montaña y los bosques de pino y pino-encino, se pueden utilizar las relaciones G-Biomasa aérea de la Figura 13. De las relaciones de la Figura 9 y 13, se puede establecer una relación única para los tipos de bosques de la comunidad, simplificando el proceso de estimación de la biomasa aérea a la estimación del área basal.

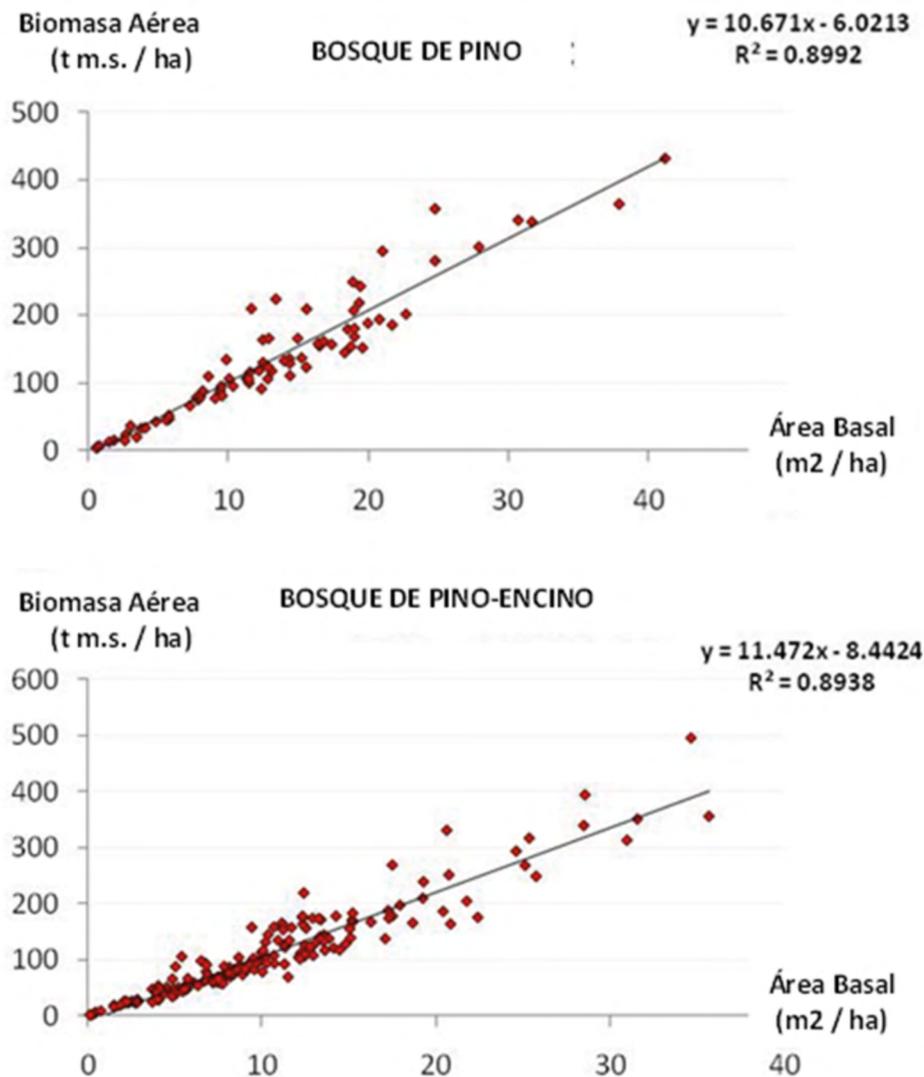


Figura 13. Relación entre el área basal ($m^2 ha^{-1}$) y la biomasa aérea ($Mg ha^{-1}$ de materia seca) de los bosques de pino y pino-encino de Chiapas, con datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal del 2009.

La Figura 13 muestra la relación entre los datos duros y blandos de G para los 10 muestreos cuantitativos y semicuantitativos pareados. La relación es de tipo, Figura 14a:

$$\hat{z} = a + bz \quad (13)$$

donde a y b son constantes del ajuste estadístico. Para la estimación de las probabilidades de clasificación p_1 y p_2 se puede transformar la relación (13), Figura 14b:

$$\frac{(z-a)}{b} = z \quad (14)$$

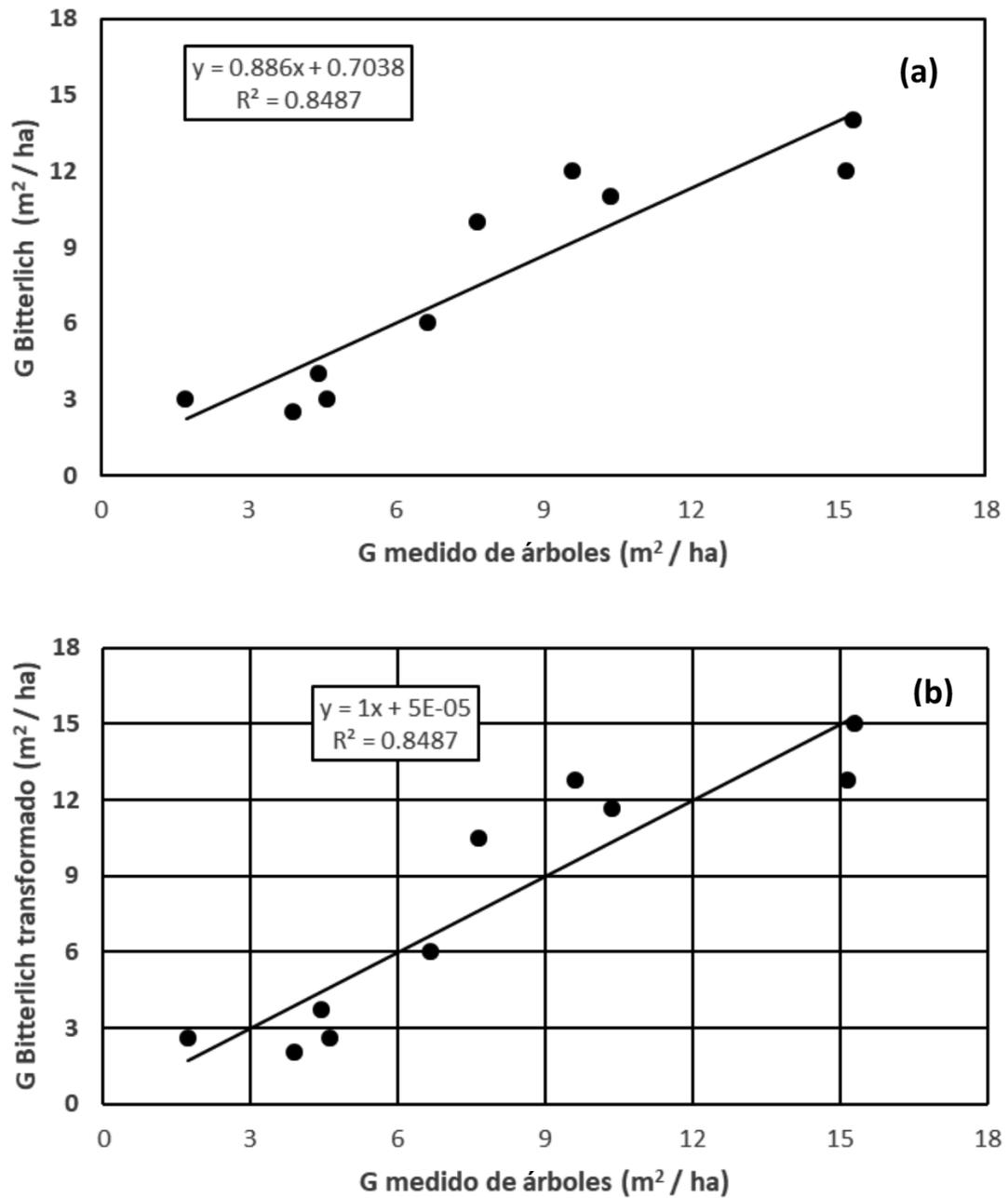


Figura 14. Relación entre datos duros y blandos para G. (a) datos originales y (b) datos transformados.

El Cuadro 8 muestra la codificación de los datos duros para G (m² ha⁻¹) para la distribución de probabilidad acumulada (límites superiores de z), con un promedio de 7.953 m² ha⁻¹.

Cuadro 8. Codificación de los datos duros z.

Límite Superior z	P ₁	P ₂	10.380	6.674	4.622	1.733	3.911	9.609	4.440	15.322	15.176	7.661
3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
9	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
12	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
15	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
17	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

En el Cuadro 9 se muestra la codificación de los datos blandos para G (m² ha⁻¹), donde p₁ y p₂ se estimaron de acuerdo con la Figura 6 y relaciones (5) y (6). Nótese que para los límites superiores 15 y 17 m² ha⁻¹ se tiene p₂ = 0.5, por lo que no contiene información susceptible de usarse.

Cuadro 9. Codificación de los datos blandos \hat{z} pareados con datos duros z.

Límite Superior \hat{z}	p ₁	p ₂	11.621	5.978	2.592	2.592	2.027	12.750	3.720	15.007	12.750	10.492
3	1.000	0.222	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
6	1.000	0.167	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
9	0.833	0.000	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
12	0.875	0.000	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
15	1.000	0.500	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
17	1.000	0.500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

La distribución de probabilidad acumulada $F(z)$ de los datos duros se muestra en la Figura 15, en donde se observa que para $F(z) = 0.8$ los valores son constantes.

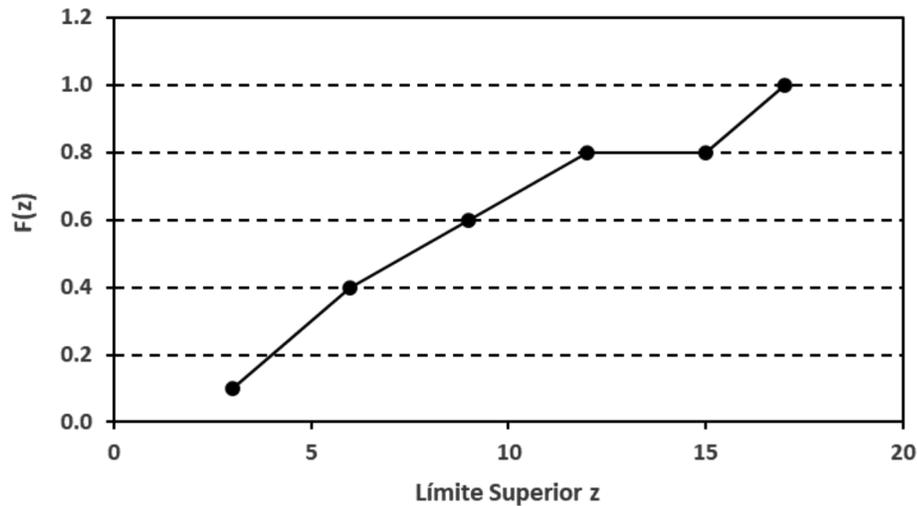


Figura 15. Distribución de probabilidad acumulada $F(z)$ para los datos duros.

En la Figura 16 se muestra la distribución de probabilidad acumulada con el uso de datos duros ($N_h = 10$) y datos blandos ($N_s = 27$), relación (9), donde los límites inferior y superior se extrapolaron linealmente (Goovaerts, 1997).

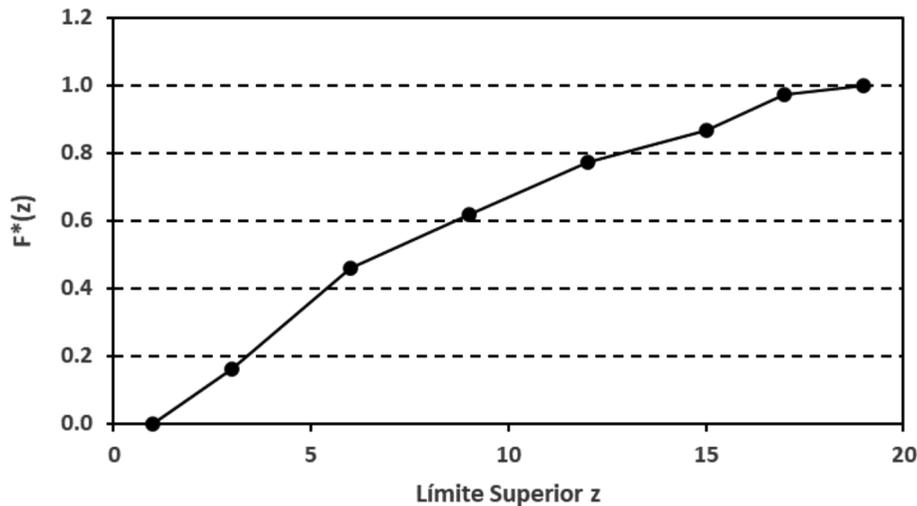


Figura 16. Distribución de probabilidad acumulada $F^*(z)$ para los datos duros y blandos con el uso de la relación (9) y extrapolando valores para el límite inferior y superior de la distribución.

El promedio de la estimación de G es de $7.943 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, valor cercano al estimado con los datos duros. Con la distribución de probabilidad acumulada es posible definir el intervalo de confianza del promedio en términos no paramétricos.

Estimación del carbono orgánico del suelo

Para evaluar el contenido de carbono orgánico del suelo o COS (Mg C ha^{-1}) con datos de los muestreos semicuantitativos, se estimó la densidad aparente del suelo con el uso de las categorías de compactación de suelo establecidas y las clases de colores definidas. No se realizó corrección para los fragmentos gruesos en los datos cuantitativos, ni semicuantitativos.

La Figura 17a muestra la relación de la concentración de COS medida con datos duros (COS medidos) y estimada con datos blandos (COS estimado). En la Figura 17b se muestra la relación transformada entre los tipos de datos usando la relación (14). De acuerdo

con la información, la estimación de la distribución de probabilidad acumulada sigue los mismos pasos que en el caso del área basal G, discutida previamente.

El uso del promedio de las clases de densidad aparente (Cuadro 6) y de materia orgánica del suelo (carbono orgánico = $0.58 \times$ materia orgánica) (Cuadro 7), no refleja las incertidumbres en las estimaciones del COS. Una forma más adecuada de considerar las estimaciones de la densidad aparente y concentración de carbono orgánico en el COS es el uso de intervalos asociados a clases, tal como se sugiere en los cuadros 6 y 7. Para realizar estimaciones del COS, relación (12), se debe emplear la aritmética de intervalos (Moore, 1966).

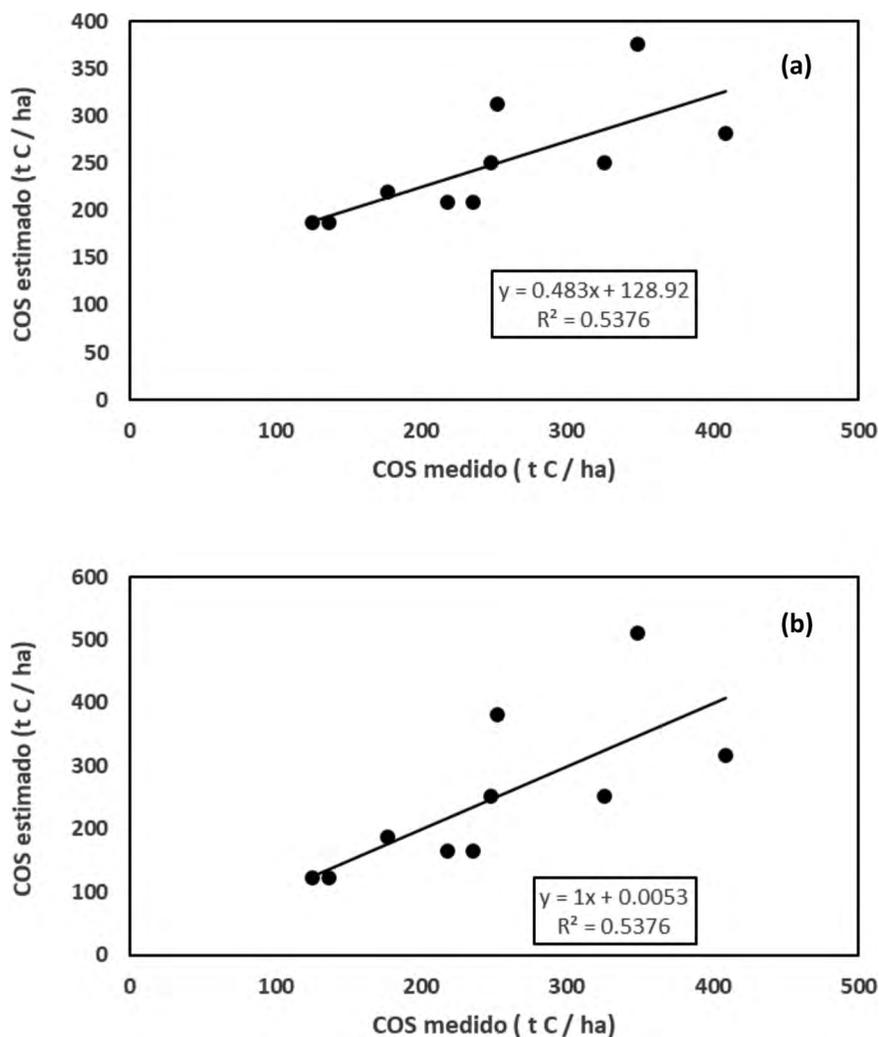


Figura 17. Relación entre datos duros (medidos) y blandos (estimados) para el carbono orgánico del suelo. (a) datos originales y (b) datos transformados.

DISCUSIÓN

La integración de datos duros y blandos a través de las probabilidades de clasificación, admite fusionar información de muestreos profesionales (cuantitativos) y comunitarios (semicuantitativos) en forma correcta, permitiendo el uso de datos indirectos objetivos o subjetivos para realizar estimaciones con diferentes niveles de incertidumbre. La determinación de las probabilidades de clasificación p_1 y p_2 permite cuantificar la incertidumbre en las relaciones entre datos duros y blandos, de tal manera que la contribución de los datos blandos a los datos duros puede incorporarse en forma adecuada.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de integración de fuentes de información a las comunidades de la Región Sierra-Costa, particularmente en la comunidad Pakayal, muestran el potencial para reducir las incertidumbres al considerar el uso de variables indirectas fácilmente medibles en campo, reduciendo tiempos y costos de los inventarios de los almacenes de carbono.

Para extender el uso y precisión del uso de datos blandos es posible la utilización de dispositivos móviles (celulares o SmartPhones) en los monitoreos comunitarios (Pratihast *et al.*, 2013b). Para el caso del área basal de los árboles, el uso de la técnica de Bitterlich se ha implementado en dispositivos móviles con resultados aceptables (Ficko, 2020; Molinier *et al.*, 2016; Pitkänen *et al.*, 2022; Rybakov *et al.*, 2018; Vastaranta *et al.*, 2015), así como las estimaciones del diámetro normal y la altura total (Vastaranta *et al.*, 2015) o la altura total de los árboles (Bijak y Sarzynski, 2015).

La estimación del mantillo mediante el uso de dispositivos móviles también ha dado buenos resultados (Laamrani *et al.*, 2018).

Aun cuando se ha propuesto el uso de dispositivos móviles para estimar los componentes del almacén de carbono orgánico del suelo mediante estimaciones indirectas y visuales, usando las relaciones de FAO (2009) para la densidad aparente y la materia orgánica del suelo (Bautista *et al.*, 2016), el proceso automático de las componentes se ha implementado en diferentes aplicaciones.

Se ha considerado la evaluación del color del suelo para la estimar la concentración de carbono orgánico (CO) con el sistema de color Munsell-HVC

(Hue, Value, Chroma) en aplicaciones de dispositivos móviles (Fan *et al.*, 2017; Gómez-Robledo *et al.*, 2013) y los resultados han sido mixtos, pero también pueden usarse otros sistemas (Viscarra *et al.*, 2006). El sistema de la Comisión Internationale l'Eclairage denominado CIE-L*a*b* se ha propuesto como un sustituto mejor que el sistema de Munsell (Melville y Atkinson, 1985) y se utilizó para caracterizar los óxidos de Fe del suelo (Kirillova *et al.*, 2015; Moritsuka *et al.*, 2014; Viscarra-Rosell *et al.*, 2008; Vodyanitskii y Kirillova, 2016; Vodyanitskii y Savichev, 2017). El CO ha sido relacionado con L* (Baumann *et al.*, 2016; Moritsuka *et al.*, 2014; Vodyanitskii y Kirillova, 2016) y con los parámetros L*, a* y b* usando relaciones lineales (Jorge *et al.*, 2021; Liles *et al.*, 2013; Vodyanitskii y Savichev, 2017) que mejoran las correlaciones obtenidas. La humedad del suelo interfiere con las relaciones de CO para valores mayores del 10%, por lo que debe considerarse al momento de establecer relaciones con CIE-L*a*b* (Fu *et al.*, 2019).

Los dispositivos móviles con estimaciones del color del suelo han sido propuestos para la ciencia ciudadana (Jorge *et al.*, 2021) de estimaciones masivas. Las relaciones establecidas por FAO (2009) para el caso del color y la textura del suelo usando el sistema de Munsell, pueden convertirse al sistema CIE-L*a*b* (Kirillova *et al.*, 2015) de modo que pueda usarse para estimaciones de ciencia ciudadana.

El uso de dispositivos móviles también se ha utilizado en estimaciones de fragmentos gruesos, en términos volumétricos y gravimétricos, con resultados alentadores (Gallegos *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2020; Rahmani *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La integración de datos duros (cuantitativos) y blandos (semicuantitativos) usando probabilidades de clasificación, permite el uso intensivo de información indirecta de bajo costo y rápida. Con el enfoque de integración de datos, el monitoreo comunitario es fácil de implementar, reduciendo la complejidad de sus estimaciones, sin disminuir artificialmente las incertidumbres asociadas a los diferentes tipos de datos.

La extensión de los monitoreos comunitarios al uso de dispositivos móviles, permite estandarizar los procesos de evaluación en forma precisa, facilitando la estimación de las componentes de los almacenes de carbono.

RECONOCIMIENTO

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a través del FORDECYT-PRONACES para realizar este trabajo mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”

LITERATURA CITADA

- Alabert, F. 1987. Stochastic Imaging of Spatial Distributions using Hard and Soft Information. M.Sc. Thesis. Stanford University. Stanford, CA. 416 p.
- Angelsen, A., C. Martius., V. De Sy., A. E. Duchelle., A. M. Larson and P. T. Thuy. 2021. REDD+: La Transformación. Lecciones y Nuevas Direcciones. CIFOR. Bogor, Indonesia. 338 p.
- Baumann, K., I. Schöning., M. Schrupf., R. H. Ellerbrock and P. Fourier. 2016. Rapid assessment of soil organic matter: soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma* 278:49-57.
- Bautista, F., E. García and A. Gallegos. 2016. The App SOC plus a tool to estimate and calculate organic carbon in the soil profile. *Journal of Applied Research and Technology* 14:135-139.
- Bijak, S. and J. Sarzyński. 2015. Accuracy of smartphone applications in the field measurements of tree height. *Folia Forestalia Polonica* 57: 240–244.
- Brofeldt, S., I. Theilade., N. D. Burgess., F. Danielsen., M. K. Poulsen., T. Adrian., T. N. Bang., A. Budiman., J. Jensen., A. E. Jensen., Y. Kurniawan., S. B. L. Laegaard., Z. Mingxu., M. van Noordwijk., S. Rahayu., E. Rutishauser., D. Schmidt-Vogt., Z. Warta and A. Widayati. 2014. Community monitoring of carbon stocks for REDD+: does accuracy and cost change over time? *Forests* 5:1834-1854.
- Climate Action Reserve. 2020. Protocolo Forestal para México. Versión 2.0. https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2020/08/Mexico_Forest_Protocol_V2.0_Espanol_Package_080420.pdf (Consulta: octubre 10, 2021).
- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México. 140 p.
- Danielsen, F., M. Skutsch., N. D. Burgess., P. M. Jensen., H. Andriandrasana., B. Karky., R. Lewis., J. C. Lovett., J. Massao., Y. Ngaga., P. Phartiyal., M. K. Poulsen., S. P. Singh., S. Solis., M. Sorensen., A. Tewari., R. Young and E. Zahabu. 2011. At the heart of REDD+: a role for local people in monitoring forests? *Conservation Letters* 4:158-167.
- Danielsen, F., N. D. Burgess., A. Balmford., P. F. Donald., M. Funder., J. P. G. Jones., P. Alviola., D. S. Balete., T. Blomley., J. Brashares., B. Child., M. Enghoff., J. Fjeldsa., S. Holt., H. Hubertz., A. E. Jensen., P. M. Jensen., J. Massao., M. M. Mendoza., Y. Ngaga., M. K. Poulsen., R. Rueda., M. Sam., T. Skielboe., C. Stuart-Hill., E. Topp-Jorgensen and D. Yonten. 2009. Local participation in natural resource monitoring: a characterization of approaches. *Conservation Biology* 23:31-42.
- de Jong, B., C. Anaya., O. Maser., M. Olguín., F. Paz., J. Etchevers., R. D. Martínez., G. Guerrero and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701.
- Fan, Z., J. E. Herrick., R. Saltzman., C. Matteis., A. Yudina., N. Nocella., E. Crawford., R. Parker and J. Van Zee. 2017. Measurement of soil color: a comparison between smartphone camera and the Munsell color charts. *Soil Science Society of America Journal* 81:1139-1146.
- FAO. 2009. Guía para la Descripción de Suelos. Roma, Italia. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016000087> (Consulta: agosto 03, 2021).
- FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes. – GSOC-MRV Protocol. Rome, Italy. 140 p.
- Fernández, R. N., D. G. Schulze., D. L. Coffin and G. E. Van Scoyoc. 1988. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Science Society of America Journal* 52:1023-1026.
- Ficko, A. 2020. Bayesian evaluation of smartphone applications for forest inventories in small forest holdings. *Forests* 11:1148. DOI:10.3390/f11111148.
- Folk, R. L. 1951. A comparison chart for visual percentage estimation. *Journal of Sedimentary Petrology* 21:32-33.
- Franzmeier, D. P. 1988. Relation of organic matter content to texture and color of Indiana soils. *Proceedings of the Indiana Academy of Sciences* 98:463-471.
- Fu, Y., P. Taneja., S. Lin., W. Ji., V. Adamchuk., P. Daggupati and A. Biswas. 2019. Predicting soil organic matter from cellular phone images under varying soil moisture. *Geoderma* 361:114020. DOI:10.1016/j.geoderma.2019.114020.
- Gallegos, A., F. García-Olía., A. Pereira-Corona and F. Bautista. 2021. Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico. *Geoderma Regional* 26: e00403. DOI:10.1016/j.geodrs.2021.e00403.
- GOFC-GOLD. 2016. A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Associated with Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forests Remaining Forests, and Forestation. GOFC-GOLD Report version COP22-1. GOFC-GOLD Land Cover Project Office. Wageningen University, The Netherlands. 268 p.

- Gómez-Robledo, L., N. López-Ruiz., M. Melgosa., A. J. Palma., L. F. Capitán-Vallvey and M. Sánchez-Marañón. 2013. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: an experiment under controlled illumination conditions. *Computers and Electronics in Agriculture* 99:200-208.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press. New York, U.S.A. 483 p.
- Hawthorne, S. and M. Boissiere. 2014. Literature Review of Participatory Measurement, Reporting and Verification (PMRV). Working Paper 152. CIFOR. Bogor, Indonesia. 27 p.
- Hawthorne, S., M. Boissiere., M. E. Felker and S. Atmadja. 2016. Assessing the claims of participatory measuring, reporting and verification (PMR) in achieving REDD+ outcomes: a systematic review. *Plos One* 11: e0157826. DOI: 10.1371/journal.pone.0157826.
- Hewson, M., K. Steininger y S. Pesmajoglou. 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+ Versión 2.0. Programa de Carbono Forestal, Mercados y Comunidades financiado por USAID. Washington, D.C., USA. 43 p.
- IPCC. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraiishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. 590 p.
- IPCC. 2006. *Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. 20 p.
- Jiang, Z. D., Q. B. Wang., K. Adhikari., K. R. Brye., Z. X. Sun., F. J. Sun and P. R. Owens. 2020. A vertical profile imaging method for quantifying rock fragments in gravelly soil. *Catena* 193:104590. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104590
- Jorge, N. F., J. Clark., M. L. Cárdenas., H. Geoghegan and V. Shannon. 2021. Measuring soil colour to estimate soil organic carbon using large-scale citizen science-based approach. *Sustainability* 3:11029. DOI:10.3390/du131911029
- Journel, A. G. 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Mathematical Geology* 15:445-468.
- Kern, J.S. 1995. Geographic patterns of soil water-holding capacity in the contiguous United States. *Soil Science Society of America Journal* 59:1126-1133.
- Kershaw, J. A., M. J. Ducey., T. W. Beers and B. Husch. 2016. *Forest Mensuration*. 5th ed. John Wiley and Sons. DOI: 10.1002/9781118902028.
- Kirillova, N. P., Y. N. Vodyanitskii and T. M. Sileva. 2015. Conversion of soil color parameters from Munsell system to the CIE-L*a*b* system. *Eurasian Soil Science* 48:468-475.
- Konen, M. E., C. L. Burras and J. A. Sandor. 2003. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationship for cultivated soils in North Central Iowa. *Soil Science Society of America Journal* 67:1823-1830.
- Laamrani, A., R. Pardo-Lara, A., A. Berg., D. Branson and P. Joose. 2018. Using a mobile device “App” and proximal remote sensing technologies to assess soil cover fractions on agricultural fields. *Sensors* 18:708. DOI:10.3390/s18030708.
- Larrazábal, A., M. K. McCall., T. H. Mwampamba and M. Skutsch. 2012. The role of community carbon monitoring for REDD+: a review of experiences. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4:707-716.
- Liles, G. C., D. E. Beaudette., A. T. O’Green and W. R. Horwath. 2013. Developing predictive soil C models for soils using quantitative color measurements. *Soil Science Society of America Journal* 77:2173-2181.
- McCall, M. K., N. Chutz and M. Skutsch. 2016. Moving from measuring, reporting, verification (MRV) of forest carbon to community mapping, measuring, monitoring (MMM): perspectives from Mexico. *Plos One* 11: e0146038. DOI: 10.1371/journal.pone.0146038.
- Mehler, K., I. Schöning and M. Beerli. 2014. The importance of rock fragment density for the calculation of soil bulk density and soil organic carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal* 78:1186-1191.
- Melville, M. D. and G. Atkinson. 1985. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *Journal of Soil Science* 36:495-512.
- Molinier, M., C. A. López-Sánchez., T. Toivanen., I. Korpela., J. J. Corral-Rivas., R. Tegujeff and T. Häme. 2016. Relasphone – mobile and participative in situ forest biomass measurements supporting satellite image mapping. *Remote Sensing* 8:869. DOI:10.3390/rs8100869.
- Moore, R. E. 1966. *Interval Analysis*. Prentice Hall. Englewood Cliff, New Jersey. Science 158:365. DOI: 10.1126/science.158.3799.365.
- Moritsuka, N., K. Matsuoka., K. Katsura., S. Sano and J. Yanai. 2014. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 60:474-485.
- Palmer-Fry, B. 2011. Community forest monitoring in REDD+: The “M” in MRV? *Environmental Science & Policy* 14:181-187.
- Paz, F. y B. de Jong. 2012. Desarrollo de una estrategia de mapeo del carbono en ecosistemas terrestres usando fusión de información cuantitativa y semicuantitativa en campo bajo el principio de conservación de la incertidumbre. pp. 275-280. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

- Paz, F., B. de Jong., S. Covaleda., M. G. Morales., I. Amezcua., J. C. Gómez., M. M. Torres y A. Vargas. 2012. Monitoreo forestal comunitario en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 759-766. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Pitkänen, T. P., M. Rätty., P. Korhonen and J. Vauhkonen. 2022. Using auxiliary data to rationalize smartphone pre-harvest forest mensuration. *Forestry* 95:247-260.
- PMC. 2011a. Manual de criterios para la selección de las parcelas de muestreo cuantitativas y semicuantitativas (Versión 1.31). Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C.O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México. 60 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: noviembre 12, 2021).
- PMC. 2011b. Manual de campo para el Inventario Forestal Estatal Cuantitativo (Versión 2.11). Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C.O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México. 129 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: noviembre 19, 2021).
- PMC. 2011c. Muestreo semicuantitativo. Inventario Forestal Estatal Cuantitativo, Bosques y Selvas. Manual de Referencia (Versión 2.1). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Marcos Casiano, Carlos O. Cruz, Jesús Argumedo, Ben de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México. 49 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: noviembre 24, 2021).
- PMC. 2015. Manual de procedimientos inventario semicuantitativo de carbono+. Estudio de factibilidad Técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Fabiola Rojas-García y Julio Cesar Wong. Texcoco, Estado de México, México. 58 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: noviembre 27, 2021).
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66.
- Poesen, J. and H. Lavee. 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23:1-28.
- Post, W. M., R. C. Izaurralde., L. K. Mann and N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climate Change* 51:73-99.
- Pratihast, A. K., M. Herold., V. Avitable., S. de Bruin., H. Bartholomeus., C. M. Souza and L. Ribbe. 2013b. Mobile devices for community-based REDD+ monitoring: a case study for Central Vietnam. *Sensors* 13:21-38.
- Pratihast, A. K., M. Herold., V. Sy., D. Murdiyarso and M. Skutsch. 2013a. Linking community-based and national REDD+ monitoring: a review of the potential. *Carbon Management* 4:91-104.
- Rahmani, H., G. Scanlan., M. Bennamoun and R. Bowles. 2019. Automated segmentation of gravel particles from depth images of gravel-soil mixtures. *Computers and Geosciences* 128:1-10.
- Rojas-García, F., B. H. J. de Jong., P. Martínez-Zurimendi y F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- Rojas-García, F., M. I. Marín-Sosa y F. Paz Pellat. 2014. Monitoreo de Carbono en Seis Comunidades Ubicadas en la Sierra madre en el Estado de Chiapas. Consultoría: Estudio de Factibilidad para promover el acceso de los usuarios del suelo a mecanismos de mercado de los SE carbono, agua y biodiversidad en la región Sierra-Costa de Chiapas, preparado por Kibeltik Clima y Medio Ambiente para Conservación Internacional México. San Cristóbal de las Casas. Chiapas. http://pmcarbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php (Consulta: diciembre 03, 2021).
- Romahn de la Vega, C. 1999. Relascopia, Una Técnica de Medición Forestal. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 116 p.
- Rybakov, G., J. Peuhkurinen., P. Latva-Käyrä., M. Villikka., S. Sirparanta., A. Kolesnikov., V. Junttila and T. Kauranne. 2018. Combining camera relascope-measured field plots and multi-seasonal Landsat 8 imagery for enhancing the forest inventory of boreal forests in Central Russia. *Remote Sensing* 10:1796. DOI:10.3390/rs10111796.
- Rytter, R. M. 2012. Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stocks. *Catena* 95:153-159.
- Schulze, D. G., J. L. Nagel., G. E. Van Scoyoc., T. L. Henderson., M. F. Baugardner and D. E. Stott. 1993. Significance of organic matter in determining soil colors. In: M. Bigham and E.J. Sjolokosz (eds.). *Soil Color*. SSSA Special Publication No. 31. Madison, WI, USA.
- Skutsch, M. 2011. *Community Forest Monitoring: Opportunities for the Carbon Market*. Earthscan. London, UK. 208 p.
- Skutsch, M. and E. Turnhout. 2020. REDD+: if communities are the solutions, what is the problem? *World Development* 130:104942. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.104942.
- Skutsch, M., E. Turnhout., M. J. Vijge., M. Herold., T. Wits., J. W. den Vesten and A. Balderas Torres. 2014b. Options for the national framework for benefit distribution and their relation to community-based and national REDD+ monitoring. *Forests* 5:1596-1617.
- Skutsch, M., M. K. McCall and A. P. Larrazábal. 2014a. Balancing view of community monitoring: the case of REDD+, Balancing views on community monitoring: the case of REDD+. A response to "towards a more balanced view on the potentials of locally-based monitoring". *Biodiversity and Conservation* 23:233-236.

- Steinhardt, G. C. and D. P. Franzmeier. 1979. Comparison of organic matter content with soil color for silty loam soils of Indiana. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10:1271-1277.
- Vastaranta M., E. G. Latorre., V. Luoma., N. Saarinen., M. Holopainen and J. Hyypä. 2015. Evaluation of a smartphone app for forest sample plot measurements. *Forests* 6: 1179–1194.
- VCS. 2020. VCS Methodology VM0042. Methodology for Improved Agricultural Land Management. Version 1.0, Sectoral Scope 14. Document prepared by TerraCarbob LLC.113 p.
- Viscarra, R., B. Minasny., P. Roudier and A. B. McBratney. 2006. Colour space models for soil science. *Geoderma* 133:320-337.
- Viscarra-Rossel, R. A., Y. Fouad and C. Walter. 2008. Using digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Bio-systems Engineering* 100:149-159.
- Vodyanitskii, Y. N. and A. T. Savichev. 2017. The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L*a*b*. *Annals of Agrarian Science* 15:380-385.
- Vodyanitskii, Y. N. and N. P. Kirillova. 2016. Application of the CIE-L*a*b* system to characterize soil color. *Eurasian Soil Science* 49:1259-1268.
- Wills, S. A., C. L. Burras and J. A. Sandor. 2007. Prediction of soil organic carbon content using field and laboratory measurements of soil color. *Soil Science Society of America Journal* 71:380-388.
- Wingle, W. L. and E. P. Poeter, 1998. Classes vs. thresholds: A modification to traditional indicator simulation, *Advances in Geostatistics*, 1998 AAPG Annual Meeting. http://www.uncert.com/wwingle/pubs/aapg_98/class.pdf (Consulta: agosto 23, 2021).
- Wingle, W. L., E. P. Poeter and S. A. McKenna. 1998. UNCERT User's Guide (Version 1.16 ±). Department of Geology and Geological Engineering. Colorado School of Mines. Golden, CO. 461 p.
- Zhang, Y., A. E. Hertemink and J. Huang. 2019. Quantifying coarse fragments in soil samples using a digital camera. *Eurasian Soil Science* 52:954-962.
- Zhu H., and A. G. Journel. 1993. Formatting and integrating soft data: stochastic imaging via the Markov-Bayes algorithm. *In*: A. Soares A. (ed.). *Geostatistics Tróia '92. Quantitative Geology and Geostatistics*, Vol 5. Springer, Dordrecht.