

MEDIR EL CARBONO EN LOS MÚLTIPLES USOS DE LA TIERRA EN CUSAF



AgroFor



MEDIR EL CARBONO EN LOS MÚLTIPLES USOS DE LA TIERRA EN CUSAF



Medir el carbono en los múltiples usos de la tierra en CUSAF

Edición: Proyecto AgroFor – Consorcio para la Promoción de Cesiones en Uso para Sistemas Agroforestales

Cita sugerida: Suber M. y Rivera K. 2024. Medir el carbono secuestrado y almacenado en múltiples usos de la tierra en CUSAF. Lima, Perú: CIFOR-ICRAF.

Se prohíbe la venta total o parcial de esta publicación, sin embargo, se puede hacer uso de ella siempre y cuando se cite a los autores correctamente.

Esta publicación es posible en el marco del Proyecto AgroFor - Consorcio para la Promoción de Cesiones en Uso para Sistemas Agroforestales, que cuenta con el apoyo financiero de la Iniciativa Internacional de Clima y Bosque de Noruega (NICFI).



CONTENIDO

PREFACIO	7
INTRODUCCIÓN	8
HERRAMIENTAS DE CÁLCULO DE CARBONO	10
Herramientas seleccionadas	11
MARCO METODOLÓGICO	12
Carbono en seis pasos	14
Resultados con el nivel de exactitud deseado	16
PASO 1: PERSPECTIVA LOCAL	21
PASO 2: ESTRATIFICACIÓN, ZONIFICACIÓN Y CONTRASTE	22
Zonificación	23
Conciliar las perspectivas sobre la representación del paisaje basado en los diferentes tipos de conocimientos	24
PASO 3: DISEÑO Y VERIFICACIÓN EN CAMPO	25
PASO 4: MEDICIÓN EN CAMPO Y MODELAJE	27
Recorrido y caracterización de la unidad productiva	28
Establecer las unidades muestrales anidadas	29
Usos de la tierra diferentes de pastizales	31
Pastizales	34
Medición de carbono según reservorio	37
Limpieza de base de datos	44
Análisis de datos	44
Cálculo de las reservas de carbono promediadas en el tiempo para un sistema de uso de tierras	45

PASO 5: VERIFICACIÓN DE TERRENO Y ANÁLISIS	49
Verificación de la información en el terreno	49
Análisis de imágenes satelitales	50
Análisis de los cambios	51
PASO 6: ESCALAMIENTO	53
ANEXOS	54
1. Selección de herramientas	54
2. Lista de herramientas	73
3. Buenas prácticas y protocolos para el levantamiento de la información	75
4. Factores de conversión de unidad muestral a hectárea	84
5. Ecuaciones alométricos de algunas especies	85

PREFACIO

La Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre establece los mecanismos de otorgamiento de títulos habilitantes en tierras de dominio público, siendo las Cesiones de Uso para Sistemas Agroforestales (CUSAF) uno de ellos (SERFOR¹, 2015). Instituidas desde 2011, permiten formalizar prácticas productivas agroforestales y forestales de agricultores familiares a pequeña escala (máximo 100 hectáreas) integrándolas al sector forestal mediante prácticas alineadas a la conservación (Robiglio² et al., 2021). Además, las CUSAF fomentan la conservación de bosques y restauración de servicios y generan beneficios en relación con el desarrollo socioeconómico de los titulares.

Las áreas potenciales para CUSAF que se encuentran en mosaicos productivos heterogéneos incluyen unidades productivas muy pequeñas (con promedios variables según contexto, incluso a nivel distrital). El impacto en la mitigación al cambio climático de las CUSAF se evalúa contabilizando en el tiempo las existencias de carbono y sus variaciones en los usos de la tierra y los sistemas de uso de las tierras.

La escasez de información y de capacidades técnicas para detectar, representar y reportar la complejidad de los paisajes productivos de la Amazonía peruana es ampliamente reconocida. Eso es particularmente verdadero para agroforestería, plantaciones y macizos forestales a pequeña escala muy comunes en los paisajes amazónicos, que son elementos clave para las CUSAF y para el cambio climático. Por eso, hay la necesidad de fortalecer la exhaustividad y exactitud de la información para aumentar la capacidad de hacer seguimiento y de reportar satisfactoriamente sobre la implementación de ese mecanismo, y en general, para tener una representación integral del sector Agricultura Forestería y Otros cambios de uso de la Tierra y Silvicultura (AFOLU).

Una evaluación contextualizada sensible a las peculiaridades de las CUSAF y de las áreas de implementación evitará un censo del carbono en todas, manteniendo una correcta representatividad de esas áreas para contabilizar su contribución al cambio climático.

De lo anterior, se recoge en una metodología que permite estratificar y zonificar los paisajes para la implementación de la colecta de datos de carbono y escalar los resultados de cada estrata y zona a nivel de paisaje.

¹ SERFOR. (2015). Ley Forestal y de Fauna Silvestre No 29763 y sus reglamentos.

² Robiglio, V., Reyes, M., Casalprim, D., Pérez, N., Torres, P., Segura, F., & Zari, L. (2021). Diagnóstico sobre el otorgamiento y registro de cesiones en uso para sistemas agroforestales.

INTRODUCCIÓN

En los paisajes agrícolas, las existencias de carbono (reservas) se miden en la biomasa aérea y subterránea, en la necromasa y en el carbono orgánico del suelo. Evaluar el impacto de CUSAF requiere generar la evidencia sobre los cambios en las reservas de carbono entre el antes y el después de la implementación a lo largo de los años. Esto requiere un enfoque metodológico que refleje las variaciones en las reservas en las coberturas, usos y sistemas de uso de la tierra del área evaluada, según el método de ganancias y pérdidas.

“Los cambios anuales en las existencias de carbono de cualquier depósito pueden estimarse aplicando [...] el “Método de pérdidas y ganancias” a todas las pérdidas y ganancias. Las ganancias pueden atribuirse al crecimiento (aumento de la biomasa) y a la transferencia de carbono de otro depósito (p. ej. transferencia de carbono del depósito de carbono de la biomasa viva al depósito de materia orgánica muerta, debido a la cosecha o a perturbaciones naturales). Las ganancias se marcan siempre con un signo positivo (+).

Las pérdidas pueden atribuirse a transferencias de carbono de un depósito a otro (p. ej. el carbono contenido en la broza durante una operación de cosecha es una pérdida del depósito de biomasa aérea), o las emisiones debidas a degradación, cosecha, quemado, etc. Las pérdidas se marcan siempre con un signo negativo (-)” (IPCC³, 2006)

Cuando la evaluación es aplicada a nivel de paisajes y durante un plazo de tiempo suficientemente amplio, se puede aplicar a los resultados un enfoque de “existencias promediadas en el tiempo”, que equilibra las pérdidas y ganancias anuales con valores referentes a ciclos temporales típicos del contexto evaluado⁴. Eso requiere, escoger bien los límites espaciales del contexto a evaluar, y los límites temporales aplicados a la evaluación, bajo consideraciones de exactitud y disponibilidad de recursos.

³ Capítulo 2: Metodologías genéricas aplicables a múltiples categorías de uso de la tierra. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero

⁴ Ver Paso 4, Análisis de datos, cálculo de las reservas de carbono promediadas en el tiempo para un sistema de uso de tierras

Este manual, presenta una caja de herramientas que responde a esas necesidades y que se construye sobre metodologías recomendadas para estimar y monitorear existencias de carbono en paisajes donde se realizan prácticas agroforestales (incluye silvopastoriles) en múltiples usos de tierra. Introduce, además, adaptaciones basadas en las lecciones aprendidas en los pilotos implementados en los departamentos de San Martín y Amazonas por el proyecto AgroFor en los años 2022 y 2023, que permiten una aplicación al contexto amazónico peruano.

El presente manual, producido por el Centro Internacional de Investigación Agroforestal, hoy CIFOR-ICRAF, en el marco del proyecto AgroFor, implementado a través del financiamiento de la Iniciativa Internacional de Clima y Bosques de Noruega (NICFI), presenta un enfoque metodológico que responde a la necesidad evidenciada, brindando una metodología estandarizada y replicable para el levantamiento y seguimiento en el tiempo de la contribución de las CUSAF a la mitigación al cambio climático.

El manual está constituido por dos secciones:

1. Herramientas de cálculo de carbono afines a CUSAF, y
2. Marco metodológico, dentro de la cual se presentan los seis pasos para la estimación de reservas de carbono. Adicionalmente, en los Anexos se comparte otro material de utilidad.

No se excluye que esta propuesta pueda tener una aplicación más amplia trascendiendo CUSAF y aplicándose a todo el contexto productivo amazónico a pequeña escala, contribuyendo así a conformar una imagen completa sobre la contribución a la mitigación de las prácticas agroforestales y de forestería a pequeña escala aquí implementadas.

SECCIÓN 1

HERRAMIENTAS DE CÁLCULO DE CARBONO

En la última década la atención al impacto ambiental de las prácticas agrícolas ha incrementado fuertemente, especialmente en mérito a la emisión de gases efecto invernadero (GEI) por el cambio de uso de la tierra (debido entre otros a la deforestación) y por los procesos productivos (manejo y procesamiento) de productos agrícolas.

Este interés ha impulsado la generación y afinamiento de herramientas específicas para la contabilidad de GEI en los sistemas productivos. Se han compilado base de datos de herramientas disponibles, algunas enfocadas específicamente en herramientas de contabilidad de GEI en el sector AFOLU (Colomb et al. (2013) y Deneff et al. (2012)).

Esos autores proponen la siguiente clasificación de estas herramientas:

- Calculadores, definidos como “herramientas de cálculo automatizadas basadas en la web, en Excel o en otros programas informáticos, desarrolladas para cuantificar las emisiones de GEI o las reducciones de emisiones de fincas enteras, actividades agrícolas y forestales específicas o proyectos de compensación”.
- Protocolos y lineamientos, que “describen las metodologías de cuantificación para la contabilización de los GEI procedentes de las prácticas agrícolas y forestales”.
- Métodos basados en procesos que son “modelos de investigación empíricos y mecanicistas que pueden simular directa o indirectamente las emisiones de GEI de las actividades agrícolas o forestales (por ejemplo, modelos de procesos de carbono y nutrientes).

Para establecer qué herramientas son apropiadas para el objetivo propuesto, identificamos palabras clave para hacer una búsqueda en la web y se han establecido criterios y parámetros para seleccionar y caracterizar las herramientas encontradas. Sobre los resultados se han seleccionado las herramientas adecuadas para el ámbito de CUSAF. Ese proceso está descrito en el Anexo 1.

Herramientas seleccionadas

No existe una herramienta capaz de abarcar todos los requerimientos de cuantificación manteniendo cierta flexibilidad para adaptarse a un contexto heterogéneo como el de los paisajes productivos amazónicos. Se introduce el concepto de “caja de herramientas” donde tres herramientas complementarias permiten mantener dicha flexibilidad:

- Metodología para la Evaluación Rápida de Reservas de Carbono (Rapid Carbon Stock Appraisal o RACSA, en inglés) desarrollada por ICRAF (Hairiah⁵ et al., 2010) con aplicación a escala local y resultados a nivel de paisaje, con el objetivo de generar información para los sistemas nacionales de contabilidad de gases efecto invernadero (GEI)
- Andrade H.J., Ibrahim M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? Agroforestería en las Américas 10, 39-40
- FAO. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome, FAO. 170 pp.

⁵ Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S., Ekadinata, A., Rahayu, S., & Noordwijk, M. (2010). Measuring carbon stocks across land use systems: A Manual.

SECCIÓN 2

MARCO METODOLÓGICO

La metodología propuesta incluye cuatro niveles de medición que se deben abordar:

- Arbóreo (tallo y raíces)
- Unidad muestral (biomasa aérea y subterránea de árboles y sotobosque, en necromasa y suelo)
- Sistema de uso de tierra (promedio de reservas y emisiones de un mismo tipo de sistema de uso de tierra en unidades muestrales de diferentes edades)
- Paisaje (integrar con análisis de imágenes satelitales)

Y tres los tipos de conocimiento necesarios para asegurar cumplir con los resultados esperados:

- Ecológico/local
- Políticas/público
- De modelación/científico

Las mediciones de las reservas de carbono y los niveles de conocimiento se usan para definir la clasificación y estratificación del área de estudio. Eso es especialmente verdadero en contextos donde hay prácticas de rotación como en los casos de los ciclos entre cultivos y purmas que dificultan la contabilización de las fluctuaciones de carbono en escalas de tiempo medianas.

Cuando un sistema de uso de la tierra no ha alcanzado todavía un equilibrio, y por ejemplo en un paisaje en evaluación se establecen nuevas áreas, la repartición de las unidades muestrales, y la contabilización del carbono, se ven afectados por la joven edad de esas nuevas áreas.

Sirve usar dos enfoques: el de “existencias promediadas en el tiempo” y el de “existencias promediadas en el espacio”. El primero permite dar constancia de las variaciones del carbono secuestrado que depende de la edad del sistema evaluado y por comparabilidad entre resultados introduce un valor de carbono promediado por la duración de la práctica rotacional. El segundo enfoque toma en cuenta la fracción de superficie en cada clase del sistema de uso de la tierra del que se han establecido nuevas áreas. Este análisis permite calibrar y establecer por cada clase de edad en base de su superficie el peso muestral correcto.

La clasificación y estratificación de los sistemas de uso de la tierra requieren de un equipo multidisciplinario con competencias que cubran ciencias sociales, ecología/forestales/botánicos, analistas espaciales y de teledetección, estadísticos y modeladores de datos.

El equipo se encargará de levantar y analizar toda la información requerida recogida a través de entrevistas semiestructuradas, grupos focales, análisis espaciales con SIG y teledetección, evaluación de paisajes con verificación en campo, análisis estadísticos, mediciones en campo y análisis de laboratorio.

Los resultados de la aplicación de esa caja de herramientas pueden usarse en reportes que usen enfoques de nivel 2 (Tier 2 en inglés), y también de nivel 3 (Tier 3) si se aplican metodologías más avanzadas de seguimiento en el tiempo (monitoreo). El análisis de la incertidumbre asociada a los resultados se puede realizar siguiendo "Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero" propuesto por el IPCC⁶.

⁶ IPCC 2000. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanuel, L. Buendia, R. Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa y K. Tanabe (eds.). Disponible en https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.html

Carbono en seis pasos

La metodología para la estimación de las reservas de carbono se basa en seis pasos (Figura 1). Los pasos 1 y 2 sobre perspectiva local y zonificación y contraste son actividades a nivel de paisaje. Los pasos 3, 4 y 5 se reparten entre actividades sobre elementos biofísicos (a la izquierda) y actividades relacionadas con un análisis espacial (a la derecha) y se enfocan a nivel local. El último paso es el escalamiento de la información generada a nivel de paisaje.

FIGURA 1 LOS SEIS PASOS METODOLÓGICOS SIGUIENDO LA METODOLOGÍA RACSA



Definiciones

La **cobertura del suelo** se refiere a los tipos de vegetación que cubren la superficie terrestre, es la interpretación de una imagen de satélite (digital) de las diferentes coberturas. En términos sencillos, es lo que puede verse en un mapa, incluyendo agua, vegetación, suelo desnudo y/o estructuras artificiales.

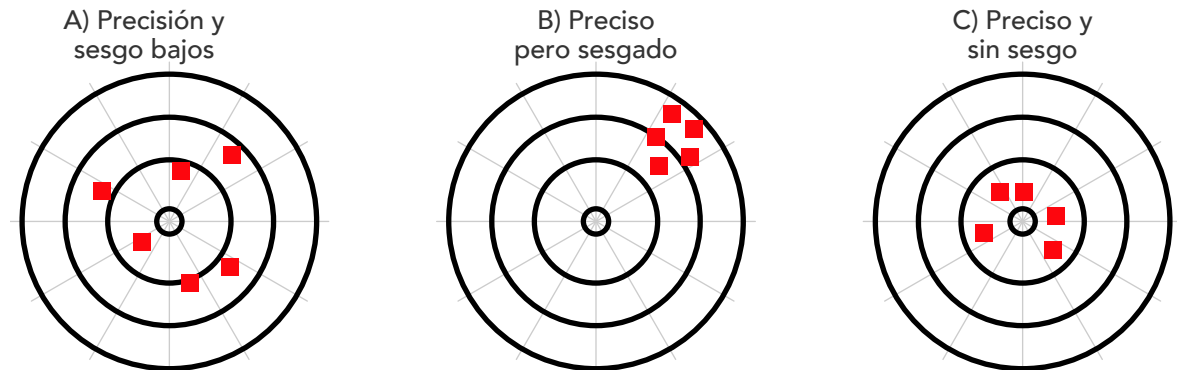
El **uso del suelo** se refiere a las actividades humanas (como agricultura, silvicultura y construcción de edificios) en un lugar concreto que alteran los procesos de la tierra, como la biogeoquímica, la hidrología y la biodiversidad. Por supuesto, los usos interactúan estrechamente con la cubierta terrestre, pero no siempre son idénticos: una misma ocupación del suelo puede tener usos diferentes y usos pueden aplicarse a diferentes cubiertas.

Los **sistemas de uso del suelo** agregan a la información sobre la cobertura y el uso de la información sobre el ciclo de cambios en la vegetación y las actividades de manejo (plantación y cosecha, entre otras); para ello, se necesita más información sobre el terreno de información ecológica y a veces relativa a políticas públicas.

Resultados con el nivel de exactitud deseado

Para estimar las reservas (existencias) de carbono se procede con un muestreo representativo en lugar de con un censo. La muestra, si está bien seleccionada, cuenta con las características de la población que representa. En las mediciones de carbono esa muestra debe ser lo más cercana a la realidad de toda la población (exactitud) y precisa (con baja incertidumbre y cortos intervalos de confianza). Por eso, antes de abordar los aspectos metodológicos de cómo levantar los datos sobre carbono, es fundamental abordar la exactitud de los resultados que se quieren obtener.

FIGURA 2 EJEMPLOS DE DIFERENTES NIVELES DE SESGO Y PRECISIÓN



Resulta útil distinguir entre dos fuentes de “inexactitud” (la diferencia entre la estimación y el valor real):

- El sesgo (error sistemático) que deriva del uso de métodos y ecuaciones inexactos o mal calibrados (caso (A) Figura 2), o de planes de muestreo que den una mayor probabilidad de inclusión en la muestra a zonas con un valor relativamente bajo o relativamente alto (caso (B))
- El muestreo incompleto (error aleatorio). Puede resolverse aumentando el esfuerzo de muestreo.

En el caso de las CUSAF, los cambios en las reservas de carbono se dan en zonas relativamente pequeñas. Eso significa un esfuerzo de muestreo importante para cuantificar estos cambios. Un sistema de muestreo eficaz no implica una contabilización de las reservas a escala nacional que sería complicada y costosa, ni tampoco tener una cobertura nacional (*wall-to-wall* en inglés) para poder avanzar con la mejora de la información.

Un sistema de muestreo eficaz para carbono hace uso de uno estratificado, con su pro y contra comparado con uno aleatorio. La estratificación del paisaje según estratos basados en el contenido de carbono en la vegetación permite que:

- Si los estratos son bien definidos y homogéneos respecto al total, se puede considerar usar un número más bajo de muestras que con el muestreo estratificado aleatorio para lograr un cierto nivel de exactitud.
- Los beneficios sean particularmente pronunciados si el estrato es pequeño y representa altos valores que no serían fácilmente corregidos con un muestreo estatificado aleatorio. Ese es el caso por ejemplo de los bosques que encontramos en las áreas otorgadas por CUSAF.
- El método es más robusto si la distribución general no sigue una distribución de probabilidad normal, pero considera que sus desviaciones dentro de cada estrato son manejables.

Como elementos en contra podemos mencionar:

- Si las ponderaciones de los estratos no se conocen adecuadamente *a priori* o por otros medios, el muestreo estratificado puede estar sesgado.
- El muestreo dentro de cada estrato debe seguir siendo aleatorio (igual probabilidad de que todos los elementos del estrato se seleccionen para la observación), lo que requiere un mapeo o listado de todos los elementos del estrato.

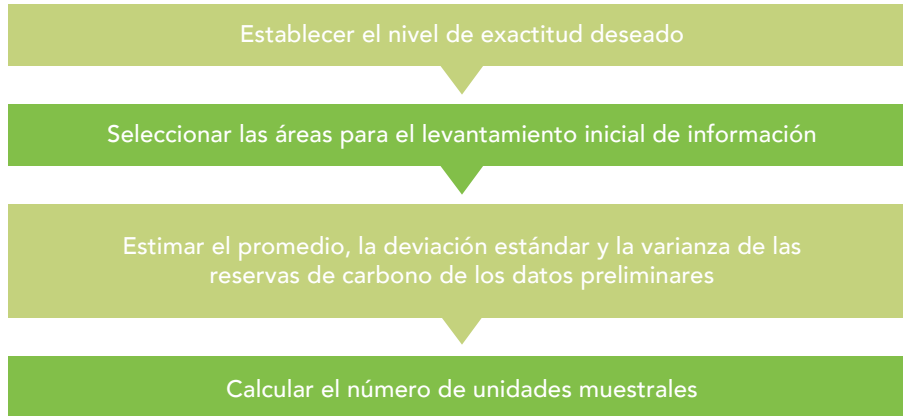
En la contabilidad de carbono, los mapas derivan de teledetección y los errores de clasificación (incertidumbre de las ponderaciones de los estratos) se relacionan con las leyendas usadas, con una tendencia a:

- Contar con una alta precisión para paisajes con una densidad de carbono baja, como en el caso de pastos.
- Dificultades en distinguir entre categorías con altas densidades de carbono, como ocurre entre bosques, purmas y sistemas agroforestales complejos.
- Clasificar erróneamente entre categorías de similar densidad de carbono.

Cuando el área de interés es suficientemente extendida, por lo que intervienen factores biofísicos como clima, topografía en la acumulación de biomasa - y por ende de carbono – y siendo esos heterogéneos, una ulterior estratificación es requerida para reducir las incertidumbres en los resultados. Este manual usa el término de zonificación asociado a ese concepto de estratificación, frente al concepto de estratificación basado en tipos de uso de la tierra / cobertura.

Determinar el número de unidades muestrales

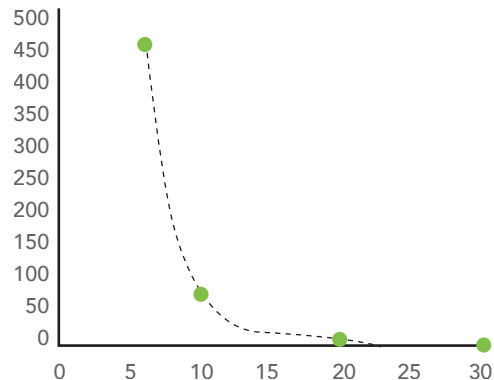
Sobre la base de la zonificación, la determinación del esfuerzo muestral a completar para la generación de información sobre las reservas de carbono en un paisaje específico se basa en cuatro pasos concretos.



Establecer el nivel de exactitud deseado

La selección del nivel de exactitud está casi siempre relacionada con los recursos disponibles y las exigencias relacionadas con el uso de la información. El nivel de exactitud requerido tiene un efecto directo en los costes de inventario, por eso cabe mencionar que se pueden definir niveles específicos de exactitud para cada componente del inventario, pudiendo así reducir eventualmente los costos totales.

FIGURA 3 RELACIÓN ENTRE NÚMERO DE UNIDADES MUESTRALES Y NIVEL DE EXACTITUD



Para los proyectos forestales (error de muestreo) es de $\pm 10\%$ del valor medio del carbono con un nivel de confianza del 95%. El Inventario Nacional Forestal del Perú – Primer panel (2019) cuenta con valores de error máximo permisible contextualizados según ecozonas. Aplica un nivel de confianza del 95%.

TABLA 1 ERROR MÁXIMO PERMISIBLE POR ÁRBOLES CON DAP ≥ 30 CM EN LA AMAZONÍA PERUANA

Selva alta		Selva baja	Hidromórfica
Accesible	De difícil acceso		
7.3%	10.1%	3.3%	10.4%

Fuente: SERFOR. 2019. Informe del inventario nacional forestal y de fauna silvestre - Primer panel

Seleccionar las áreas para el levantamiento inicial de información

Se requiere determinar la varianza existente entre cada tipo de depósito (por ejemplo, el carbono orgánico en el suelo) de cada sistema de uso de la tierra clasificado en la leyenda usada como referencia (zonificación). En función de la frecuencia del mismo estrato en la zona de interés, cada uno debe muestrearse en una zona (repetición), para que los resultados tengan validez estadística. Se recomienda utilizar de cuatro a ocho repeticiones para cada sistema de uso de la tierra.

También se puede usar información de literatura de estudios similares de ser existente. Si esa información está completa de los parámetros requeridos en el paso 3, se puede usar directamente en el calculador Excel "Winrock Terrestrial Sampling Calculator" que ayuda a calcular el número de las unidades muestrales y el costo de levantamiento inicial y de monitoreo, disponible en: <https://winrock.org/document/winrock-sample-plot-calculator-spreadsheet-tool/>.

Estimar el promedio, la desviación estándar y la varianza de las reservas de carbono de los datos preliminares

Se calculan ahora los valores promediados de carbono secuestrado en el tiempo de cada sistema de uso de la tierra identificados en el proceso de zonificación. De esos valores se calcula el promedio, la desviación estándar y la varianza del carbono.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Promedio

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Varianza

$$S = \sqrt{S^2}$$

Desviación Estándar

Calcular el número de unidades muestrales

Con el nivel de exactitud y el error estimado establecidos (paso 1) y la varianza (paso 3) es ahora posible establecer el número de unidades muestrales requeridas por cada estrato, aplicando las siguientes fórmulas:

$$n = \frac{(N \cdot S)^2}{\frac{N^2 \cdot E^2}{i^2} + N \cdot S^2}$$

Por un único sistema de uso de la tierra

$$n = \frac{(\sum_{i=1}^n N_n \cdot S_n)^2}{\frac{N^2 \cdot E^2}{i^2} + (\sum_{i=1}^n N_n \cdot S_n)^2}$$

Por más de un sistema de uso de la tierra

Donde:

n = número de unidades muestrales

E = error permitido (*precisión media* × *nivel seleccionado*)

t = muestra estadística de la distribución t para un nivel de confianza del 95% (normalmente se utiliza un valor de 2)

N = nro. de unidades muestrales en el área del estrato (*área del estrato dividida por el tamaño de la unidad muestral en ha*)

s = desviación típica del sistema de uso de la tierra

PASO 1

PERSPECTIVA LOCAL

La primera etapa metodológica consiste en la caracterización del contexto del área de estudio a través de entrevistas personales y/o grupales con actores claves (oficinas gubernamentales, academia, ONG, cooperativas y agricultores familiares locales). Es fundamental integrar a las poblaciones locales en ese proceso, no sólo como fuentes de información sino como beneficiarios de la información generada. Eso significa devolver la información recolectada para que pueda usarse en la gestión integral de sus tierras, y más allá como elemento sobre el cual tomar decisiones informadas para la planificación sobre sus medios de vida.

La caracterización del contexto del área de estudio no se limita a las CUSAF otorgadas, sino que abarca todo el paisaje en el cual esas se encuentren. Eso hace que la información recolectada mantenga su validez en el tiempo sin verse afectada por el número creciente de CUSAF otorgadas que compone el universo a muestrear.

Objetivos

- Identificar actores y el rol que cumplen en el área.
- Identificar el uso, cobertura y sistema de uso de tierras, actores relacionados y actividades que desarrollan.
- Identificar y contrastar las actividades de tierras planificadas contra las que están siendo desarrolladas.
- Identificar factores históricos, socioeconómicos y culturales.
- Identificar cambios de uso de la tierra y sus drivers.
- Identificar retos y oportunidades para lograr medios de vida sostenibles.
- Documentar la frecuencia e intensidad de conflictos e incendios forestales.

Prerrequisitos

- Imágenes/mapas satelitales, mapas de cobertura preliminares o Google Earth.
- Mapas de infraestructura vial, poblaciones y límites.
- Mapas topográficos.

Resultados

- Diagramas de uso, cobertura y sistema de uso de la tierra, relacionado a planes de uso de la tierra que muestran trayectorias pasadas.
- Mapas con información de actores identificados, sus problemas y oportunidades.
- Entrevistas personales y/o grupales documentadas y sistematizadas.

PASO 2

ESTRATIFICACIÓN, ZONIFICACIÓN Y CONTRASTE

El segundo paso metodológico prevé la identificación y estratificación del paisaje de estudio y la zonificación de las áreas donde se van a levantar los datos de carbono. Esas son actividades críticas para la exactitud de la estimación de reservas de carbono ya que la desagregación del paisaje en clases de coberturas de la tierra y zonas puede incidir fuertemente en los resultados de carbono.

La estratificación del área de estudio se basa en un análisis de todo el paisaje y no únicamente en las superficies otorgadas bajo CUSAF. Así la información recolectada mantiene su validez sin verse afectada por el creciente número de CUSAF otorgadas en el tiempo.

Los aspectos que deben de considerarse son:

1. La cobertura vegetal/ de la tierra.
2. Aspectos abióticos que afectan la productividad, y la composición de especies como la altitud, el clima, el tipo de suelo, la geología y geomorfología.
3. Las actividades antrópicas que impactan y que inducen perturbaciones a la presencia de biomasa, crecimiento y abundancia de especies. Entre esas, el manejo, que desafortunadamente en muchos casos no puede ser identificado por teledetección. Sobre la base del paso 1 es posible abordar el tema del manejo y de su intensidad para usarlo en la zonificación basándose en datos auxiliares como mapas base, aproximaciones, políticas y normativas, y una comprensión del contexto y las prácticas locales de uso de la tierra, y tipos de manejo.

La selección de los tipos de cobertura de la tierra depende de cinco elementos:

1. Un esquema de clasificación coherente para captar la variación de las existencias de carbono. Las unidades deben ser homogéneas en cuanto a propiedades clave y, entre ellas, deben abarcar todos los tipos de uso de la tierra.

2. Estratificación y zonificación basadas en factores abióticos (como suelos y zonas climáticas) y antropogénicos (clases de accesibilidad).
3. Patrones a nivel de paisaje que se reproducen, por ejemplo, rasgos únicos que definen todo un relieve o rasgo topográfico en las cuencas hidrográficas.
4. Fuente de los datos, combinando conocimiento ecológico local con mapas.
5. La vinculación con ejercicios participativo de mapeo y relacionamiento con la información espacial.

Zonificación

El objetivo de la zonificación es identificar los factores y las dinámicas que afectan las reservas de carbono en el mismo tipo de vegetación/cobertura y con ese conocimiento establecer estratos/zonas (y sus mapas) para dirigir el inventario de carbono.

Sirve considerar:

- Factores abióticos que puedan causar cambios en las reservas de carbono para coberturas similares en el paisaje considerado: temperatura, lluvias, altitud y tipo de suelo, entre otros.
- Prácticas locales de manejo y reglas que puedan cambiar el manejo de tierras.
- Disponibilidad y exactitud de información secundaria.
- Histórico de perturbaciones

Se requieren:

- Mapas de sistemas de tierras y de capacidad de uso mayor (que incluyan lluvias, temperatura, geografía, geología y tipos de suelo, entre otros).
- Mapas con límites de parcelas/zonas/áreas oficialmente reconocidas (p. ej. reservas naturales, parques, comunidades nativas, etc).

Actividades:

- Revisión de información.
- Entrevistas personales y/o grupales con actores clave.
- Recolección y evaluación de mapas relevantes.
- Evaluación técnica sobre las estratos/zonas que son factibles con la información disponible. Discusión entre analistas espaciales y ecólogos/biólogos. Regirse por el objetivo de capturar las diferencias en carbono en tipos de cobertura similares.

Conciliar las perspectivas sobre la representación del paisaje basado en los diferentes tipos de conocimientos

El objetivo de esa actividad es generar un punto común a todos los conocimientos, de forma óptima y reconocible a partir de técnicas de teledetección dentro de un nivel de error admisible, con la estimación de carbono sensible desde una perspectiva ecológica y que refleje los usos y manejos que se dan en la práctica y los contextos. El resultado es una tabla de consulta entre cobertura, usos de la tierra y sistemas de usos de la tierra, además de alternativas y esquemas de clasificación a explorar.

Se requiere:

- Diagramas de uso, cobertura y sistema de uso de la tierra, relacionado a planes de uso de tierras (Paso 1).
- Mapas con información de actores identificados, sus problemas y oportunidades (Paso 1).
- Mapas base a tres niveles:
 - A pequeña escala, que cubra un poco más de la zona de interés.
 - A mediana escala, que cubra exactamente la zona de interés.
 - A gran escala, de una subárea dentro de la zona de interés y que incluya áreas de particular interés.

Actividades:

- Revisión de análisis de imágenes satelitales usando firma espectral de las coberturas, uso de la tierra y sistema de uso de la tierra considerado.
- Discusiones entre los actores que intervienen en este paisaje y los integrantes del grupo de trabajo para desarrollar descripciones explícitas de usos y actividades de manejo. Se debe generar una tabla de consulta entre cobertura, usos de la tierra y sistemas de usos de tierra, y se debe vincular con los mapas.
- Una evaluación técnica de cuáles coberturas y usos de la tierra pueden identificarse en las imágenes satelitales a disposición. Existen disyuntivas relacionadas con escoger un sistema de clasificación muy fino y la pérdida de exactitud que deberán ser tomadas en cuenta. Regirse por el principio que los esquemas de cobertura deben capturar diferencias en las reservas de carbono y ser sensibles a las reservas de carbono.

Consideraciones:

- Resolución y firma espectral de imágenes satelitales a utilizar.
- Variabilidad espacial del área considerada.
- Composición y configuración de cada sistema de uso de la tierra.
- Habilidades técnicas.
- Portafolio de sistemas de uso de la tierra: complejidad de cobertura/usos de la tierra, duración de rotaciones.
- Disyuntiva entre exactitud y mapeo basado en una leyenda muy detallada.

PASO 3

DISEÑO Y VERIFICACIÓN EN CAMPO

El tercer paso metodológico aborda la definición de los estratos muestrales y sistemas de clasificación posteriormente utilizados por el equipo de campo. La leyenda de clases de cobertura de la tierra también deberá aplicar para “pesar” los estratos y para las mediciones de la densidad de las reservas de carbono de manera consistente. Los niveles jerárquicos más altos serán genéricos y aplicables globalmente, mientras que los más bajos son adaptados al contexto local, es decir, a los usos de la tierra y términos locales. Eso permitirá reducir la incertidumbre asociada con los valores promediados de carbono secuestrado en el tiempo en cada sistema de uso de la tierra de los estratos/zonas. Lo anterior resultará en un listado de unidades muestrales (con coordenadas), clasificadas bajo cada tipo de sistema de uso de la tierra y sus estratos/zonas respectivas.

Se requiere:

- Lista de tipos de cobertura de la tierra y estratos/zonas, y tabla de consulta de cobertura, uso y sistema de usos de la tierra (Paso 2).
- Presupuesto del proyecto, costos de mediciones en campo y de análisis de laboratorio.
- Conocimiento previo de la desviación estándar de los valores promediados de carbono secuestrado en el tiempo en cada sistema de uso de la tierra de cada estrato/zona. A falta de ello, información secundaria y por último un juicio de expertos serán aceptados.

Actividades:

- Decidir cuántas unidades muestrales pueden ser analizadas, considerando el presupuesto determinado y el nivel de incertidumbre que se acepte.
- Priorizar sistemas de uso de tierras y estratos/zonas sobre:
 - La predominancia en el área de interés (proporción de superficie).
 - Importancia del contenido de carbono y de las dinámicas de carbono y su variación entre sistemas de uso de la tierra por estrato/zona
- Con los mapas, seleccionar zonas a visitar al azar en cada sistema de uso de la tierra por cada estrato/zona. Seleccionar zonas adicionales en caso algunas de ellas sean inaccesibles.
- Identificar las rutas eficientes para cada unidad muestral a muestrear.

Consideraciones:

- Cantidad de estratos/zonas, sistema de uso y coberturas de la tierra.
- Extensión del área de interés.
- Representatividad espacial.
- Accesibilidad.
- Niveles de incertidumbre permitidos.
- Recursos.

PASO 4

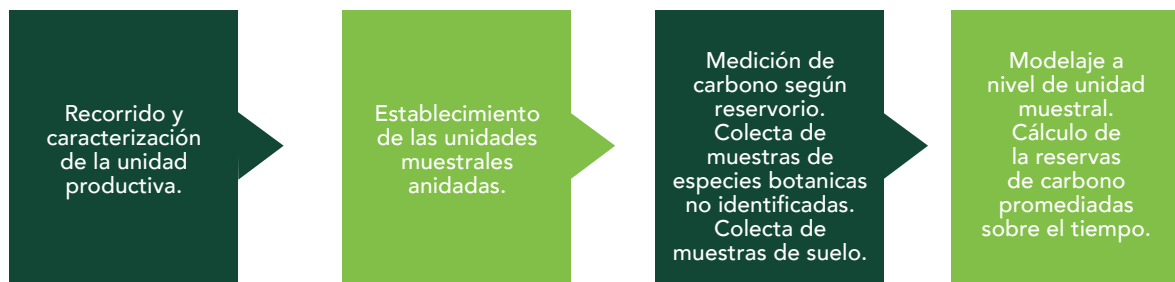
MEDICIÓN EN CAMPO Y MODELAJE

Dentro de los seis pasos de la metodología, el cuarto paso es el que más recursos y tiempo va a tomar y, por ende, debe planificarse detalladamente y con precisión antes de dar comienzo. Siendo el diseño muestral de tipo anidado y flexible según el diámetro de los árboles presentes para mantener un equilibrio entre exactitud, tiempo y recursos de la medición, se recomienda una precaución adicional al momento de la evaluación inicial de las unidades productivas ya que un error a ese nivel podría generar erratas y mal gasto de recursos. Con esas consideraciones, se limita el levantamiento de información a unidades productivas con superficie mayor o igual a 1 ha.

Las unidades productivas seleccionadas y las unidades muestrales que se establecen en ellas son de tipo **permanente**. Si a futuro quisiéramos regresar a medir nuevamente para establecer cambios en los reservorios de carbono, gracias a las coordenadas geográficas podríamos hacerlo.

La Figura 4 presenta en orden cronológico los pasos para recolectar la información que nos permite generar esos valores de carbono para los diferentes sistemas de uso de la tierra en CUSAF. Esos pasos serán tratados en detalle en las siguientes páginas según ese mismo orden.

FIGURA 4 PASOS PARA RECOLECTAR INFORMACIÓN SOBRE CARBONO Y SU MODELAJE



La recolección de data se hace a dos niveles:

1. De unidad productiva.
2. De biomasa, necromasa y suelo.

Las mediciones en campo requieren mediciones de tipo destructivo y de tipo indirecto según el reservorio (Tabla 1).

TABLA 2 TIPO DE MEDICIÓN SEGÚN RESERVORIO

Reservorio	Medición	
	Destructiva	Indirecta
Biomasa	Vegetación herbácea	Árboles
		Vegetación arbustiva
	Raíces finas	
Necromasa	Hojarasca	Madera muerta
	Raíces superficiales	
Carbono orgánico en el suelo	Suelo	

Recorrido y caracterización de la unidad productiva

El recorrido de la unidad productiva permite la observación y registro de las características de la unidad productiva en la que se van a inventariar los reservorios de carbono. Se recomienda realizar ese recorrido acompañados por la o el agricultor que maneja el área para conversar y registrar otras características no apreciables relacionadas con elementos como su historia y su manejo. Las siguientes características deberán ser anotadas:

1. Las coordenadas de los vértices. Si es posible recorrer el perímetro y registrar el trazado mejor. Para pasturas, debido a su extensión, se recomienda no hacer el trazado en campo, sino identificar las áreas por teledetección.
2. La pendiente.
3. La exposición.
4. El uso actual de la tierra.
5. Eventuales perturbaciones (fenómenos erosivos, patógenos, otros).
6. Variedad, arreglo y distancia de plantación del cultivo permanente.

La conversación con el agricultor permitirá registrar también:

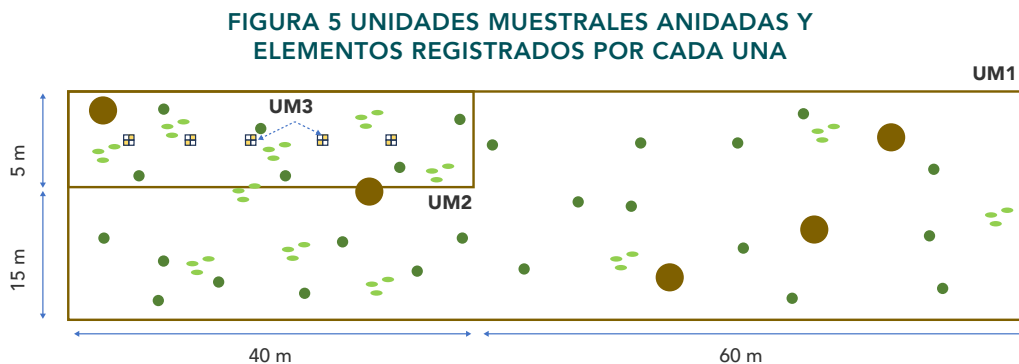
1. La historia de la unidad productiva.
2. Los cambios de uso de la tierra según años.
3. Las perturbaciones del pasado (y presente).
4. El manejo actual y, de ser posible, por cada uso histórico de la tierra.
5. En el caso de pasturas:
 - Tipo de ganado
 - Número de cabezas
 - Su permanencia a lo largo del año

Si se han presentado cambios en las y los agricultores a cargo de la unidad productiva se recomienda buscar en la comunidad personas que cuentan con información histórica para reconstruir de manera más completa posible su trayectoria en el tiempo.

En el recorrido de la unidad productiva prestar atención a tres elementos necesarios para el siguiente paso: la homogeneidad de la unidad productiva, que incluye la existencia de barreras naturales (acantilado, fuentes de agua); la densidad de árboles; y la presencia de diámetros mayores o iguales a 30 cm.

Establecer las unidades muestrales anidadas

Las unidades muestrales se disponen de manera anidada en el espacio (Figura 5). Cada unidad muestral tiene el propósito de inventariar un segmento específico de la vegetación que se encuentre en ella.

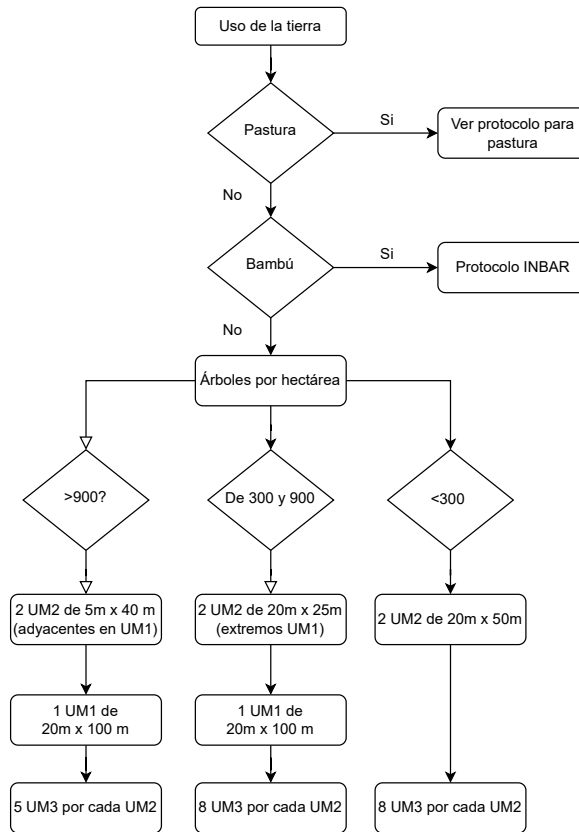


- Árboles con diámetro ≥ 30 cm, medición solo en UM1
- Árboles con diámetro entre 10 y 30 cm, medición solo en UM2
- Árboles con diámetro ≤ 10 cm, medición solo en UM3
- ▣ Unidad muestral de vegetación arbustiva, herbácea y hojarasca

Con las características y observaciones sobre la unidad productiva se determina cuáles unidades muestrales establecer y dónde establecerlas. Eso se hace en función del uso actual de la tierra y de la densidad de árboles por hectárea en la unidad productiva.

El establecimiento de las unidades muestrales anidadas se hace siguiendo el diagrama de la Figura 6. Los casos de rodales de bambú son especiales, y por eso se sugiere aplicar el protocolo metodológico sugerido por INBAR⁷. Para pastizales se ha incluido una variación el diseño muestral general, y por ende del diagrama, tratada como caso separado.

FIGURA 6 DIAGRAMA DECISIONAL PARA ESTABLECER PRIMERA UNIDAD MUESTRAL SEGÚN CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD PRODUCTIVA



⁷ Huy B. and Thang Long T. 2019. A manual for bamboo forest biomass and carbon assessment. International Bamboo and Rattan Organization (INBAR). Disponible aquí: https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/a-manual-for-bamboo-forest-biomass-and-carbon-assessment/

Usos de la tierra diferentes de pastizales

Se ha visto que las dimensiones de las unidades muestrales dependen de las densidades de los árboles a la hectárea. Tres son los casos posibles para la primera unidad muestral a instalar (UM2):

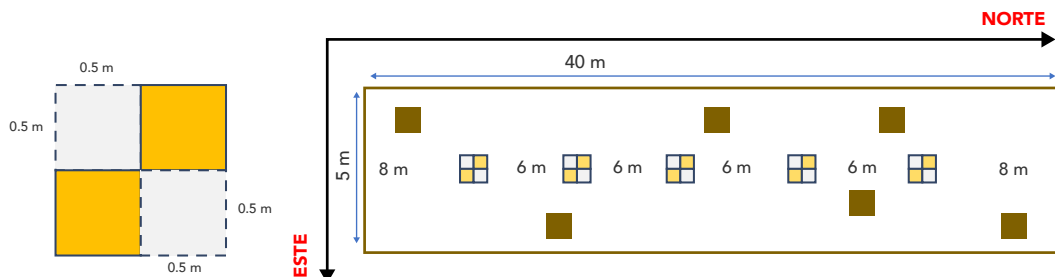
≥ 900 árboles por hectárea

La homogeneidad de la unidad productiva observada en el Paso 1 nos indicará dónde convenga posicionar las UM2 para asegurar representatividad de los datos levantados. Se establecen 2 UM2 de 5 m de ancho por 40 m de largo (200 m² cada una) para el inventario de los árboles con diámetro > 10 cm y < 30 cm. La orientación de esas será de sur a norte y de oeste a este. Cuando eso no fuera posible debido a la exposición y forma de la unidad productiva, se recomienda anotar ese elemento. Si en las UM2 se encuentran diámetros superiores o iguales a 30 cm entonces se requiere el establecimiento de la UM1 con dimensiones 20 m x 100 m (2000 m²) para el inventario de árboles con diámetro ≥ 30 cm. En ese caso, las dos UM2 deberán colindar con los extremos opuestos de la UM1 para asegurar abarcar cuanta más variabilidad de la unidad productiva posible.

Si la unidad productiva cuenta con cacao o café como cultivo perenne, se procede a su inventario completo en la superficie de ambas UM2.

La unidad muestral más pequeña (UM3) está compuesta por subunidades para el levantamiento de información sobre vegetación arbórea, herbácea y hojarasca, y suelo. Para establecerla se hace uso de subunidades de muestreo en forma de cuadrantes. Para muestras de suelo son de 1 m por 1 m y se colocan de manera aleatoria en la UM2; para los demás reservorios son de 0.5 m por 0.5 m (0.25 m² por cada uno) y se colocan de manera adyacente (Figura 7) en la UM2 según las reglas que siguen. Se establecen 5 subunidades de vegetación herbácea que serán distribuidas colocando el cuadrante en línea recta a la mitad de la UM2 y de 3 a 6 subunidades para suelo.

FIGURA 7 SUBUNIDADES DE MUESTREO PARA VEGETACIÓN ARBÓREA, HERBÁCEA Y HOJARASCA DISPUESTAS DE MANERA ADYACENTE (IZQUIERDA) Y DISTRIBUCIÓN DE SUBMUESTRAS PARA SUELO (MARRÓN), VEGETACIÓN ARBÓREA, HERBÁCEA Y HOJARASCA (AMARILLO) EN UM2 CON DENSIDAD DE ÁRBOLES SUPERIOR A 900 ÁRBOLES POR HECTÁREA (DERECHA)



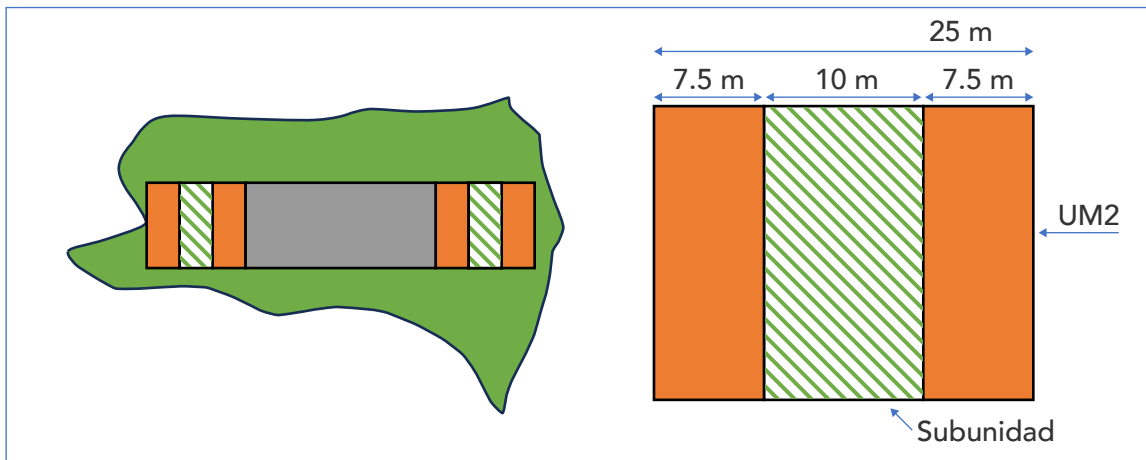
En las subunidades de muestreo para vegetación arbórea, herbácea y hojarasca se registra información sobre especies, diámetro y altura para todos los árboles de diámetro ≥ 5 cm y < 10 cm. Para los árboles de diámetro inferior se anota solamente la presencia y la especie.

Entre 300 y 899 árboles por hectárea

Se establecen dos UM2 de 20 m de ancho por 25 m de largo (500 m² cada una) (Figura 8). Lo demás aplica como para el caso anterior. En las UM2 se levantará la información de los árboles con diámetro ≥ 10 cm y < 30 cm, y en la UM1 los árboles con diámetro ≥ 30 cm.

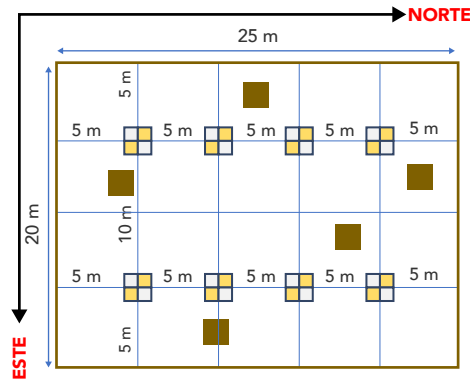
Si la unidad productiva cuenta con cacao o café como cultivo perenne en las UM2, se traza una subunidad muestral de 20 m x 10 m a la mitad del lado largo de cada UM2 y se realiza un censo de los individuos del cultivo perenne.

FIGURA 8 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS UM2 (NARANJA) FRENTE A LA UM1 (GRIS), Y DE LA SUBUNIDAD DE UM2 (VERDE RALLADO) FRENTE A LA UM2 EN CASOS DE DENSIDADES DE ÁRBOLES ENTRE 300 Y 899 POR HECTÁREA EN USOS DE LA TIERRA QUE NO SON PASTURAS



En la UM3 se establecen 8 subunidades de vegetación herbácea en la UM2 distribuidas según una malla de 5 m por 5 m, y 3-6 subunidades de suelo distribuidas de manera aleatoria (Figura 9).

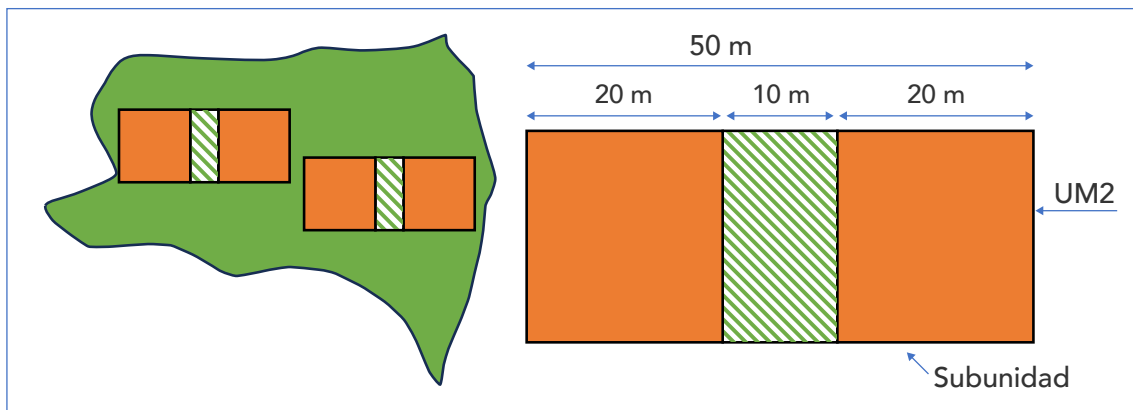
FIGURA 9 SUBUNIDADES DE MUESTREO EN UM2 CON DENSIDAD DE ÁRBOLES COMPRESA ENTRE 300 Y 900 ÁRBOLES POR HECTÁREA



< 299 árboles por hectárea

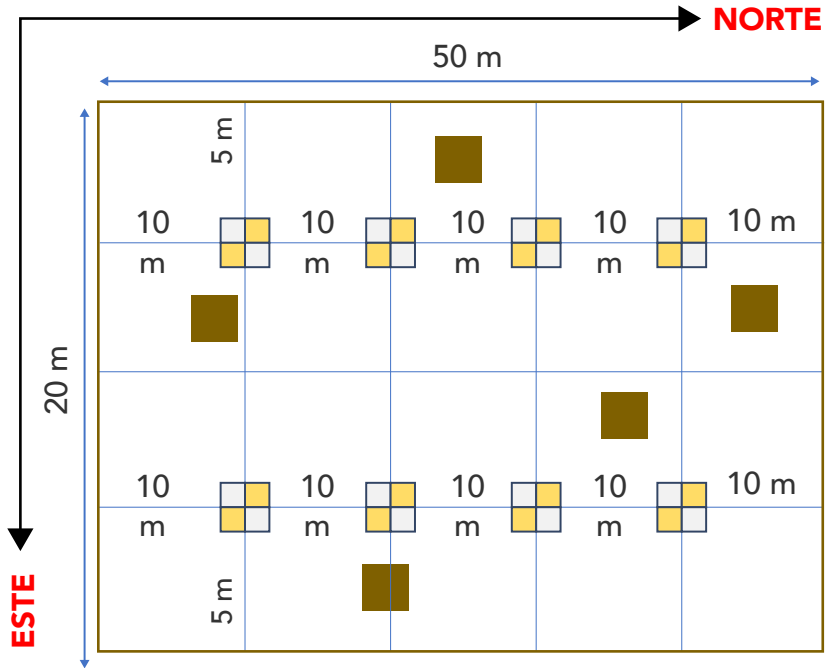
Las dos UM2 a establecer miden 20 m de ancho por 50 m de largo (1000 m² cada una) (Figura 10). En ellas se miden los árboles con diámetro ≥ 10 cm, sin límite máximo. Si la unidad productiva cuenta con cacao o café como cultivo perenne se traza una subunidad muestral de 20 x 10 m a la mitad del lado largo de cada UM2 y se realiza un censo de los individuos del cultivo perenne.

FIGURA 10 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS UM2 (NARANJA), SUBUNIDADES UM2 (VERDE RALLADO) EN CASOS DE DENSIDADES DE ÁRBOLES < 300 POR HECTÁREA EN USOS DE LA TIERRA QUE NO SON PASTURAS



La UM3 estará conformada por 8 subunidades de vegetación herbácea distribuidas en la UM2 según una malla de 10 m por 10 m, y 3-6 subunidades para suelo (Figura 11).

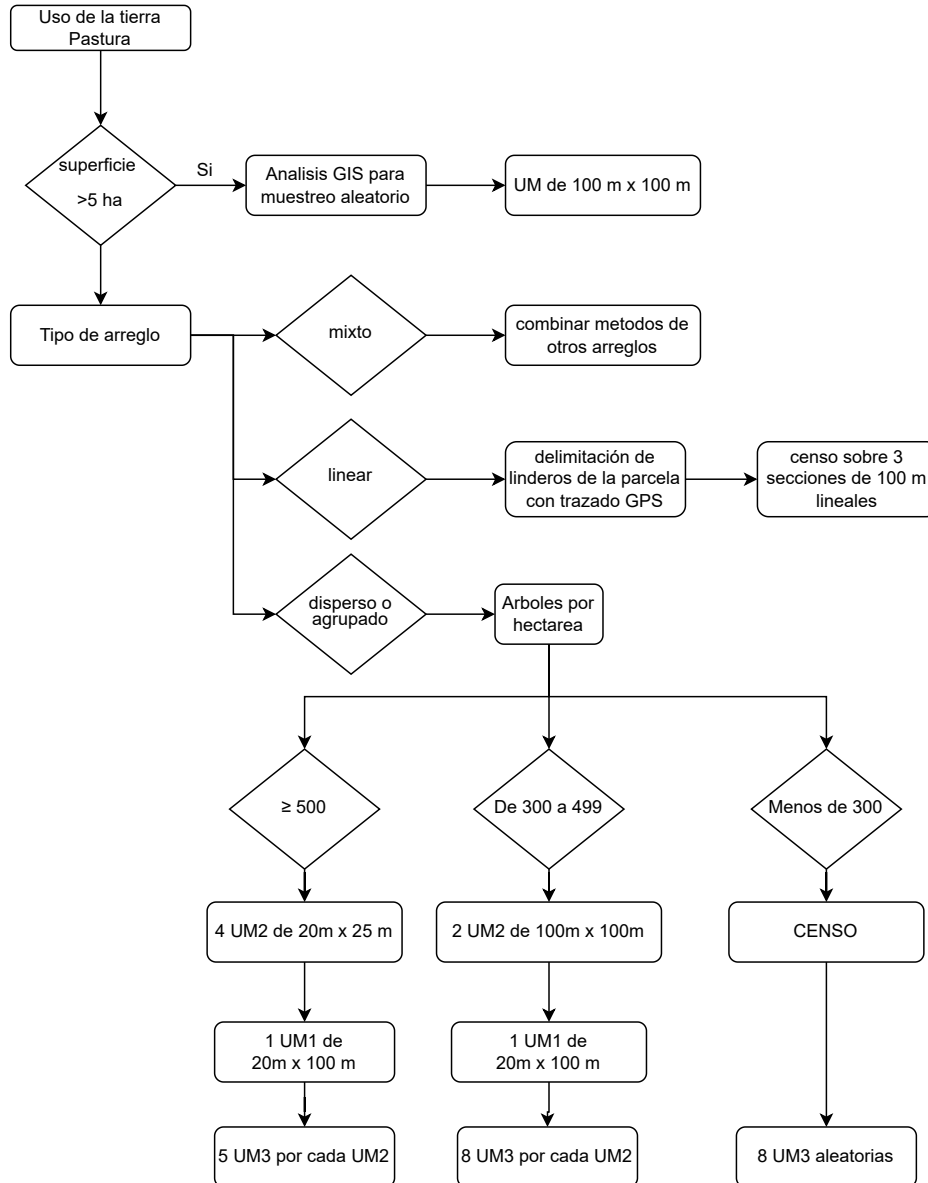
FIGURA 11 SUBUNIDADES DE MUESTREO EN UM2 CON DENSIDAD DE ÁRBOLES INFERIOR A 300 ÁRBOLES POR HECTÁREA



Pastizales

Si la unidad productiva es clasificada como pastizal⁶, el arreglo de los árboles y su densidad determinan el tipo, la cantidad y los tamaños de las unidades muestrales a establecer (Figura 12).

FIGURA 12 DIAGRAMA DECISIONAL PARA ESTABLECER PRIMERA UNIDAD MUESTRAL SEGÚN CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD PRODUCTIVA EN PASTIZALES



⁸ La diferencia entre pastura y pastizal consiste en que el primero es de origen natural y no es manejado, mientras que el segundo hace referencia a un manejo activo de un espacio convertido a uso ganadero desde otro uso de la tierra.

Con superficies de la unidad productiva de pastizales es mayores o iguales a 5 ha, se deberá proceder con la generación de un estrato de pastizales al cual se aplica un diseño muestral aleatorio y unidades de muestreo cuadradas de 100 m de lado (1 hectárea) en las que se levantan todos los árboles con diámetro superior o igual a 10 cm. El diseño muestral para levantar información sobre vegetación herbácea, arbustiva, hojarasca y suelo también será establecida con diseño aleatorio usando las mismas subunidades de muestreo en forma de cuadrantes mencionadas anteriormente.

Para los casos con superficies inferiores a las 5 hectáreas, el diseño muestral se ve condicionado por arreglo y densidad de árboles. Los sistemas silvopastoriles en el nororiente de la Amazonía peruana son de tipo extensivo, encontrándose principalmente estos cuatro arreglos:

1. Lineal determinado por cercas vivas, cortinas rompevientos, franjas en potreros, separación de unidades productivas u otros similares.
2. Disperso, donde se presenta una distribución no diseñada de los árboles dentro unidad de evaluación y de su contexto.
3. Agrupado, referido a los remanentes o parches de árboles existentes en la unidad espacial en evaluación.
4. Mixto que puede contener 2 o 3 arreglos a la vez.

En el establecimiento de las unidades muestrales se excluirán determinadas zonas, como los parches con excrementos de animales, vías de acceso de animales, caminos de entrada/salida de los prados, puntos muy cercanos a abrevaderos, puntos de agua, linderos. Dentro de cada unidad muestral los lugares de muestreo del suelo deben determinarse aleatoriamente para evitar sesgos. Las modalidades de establecimiento de UM3 coinciden con lo explicado anteriormente para otros usos de la tierra.

Arreglo lineal

- Es el caso de linderos, rompevientos, potreros y cercas vivas.
- Se establece 3 unidades de muestreo lineal de 100 metros cada una separada al menos por 100 m lineales entre ellas.
- Si no existiera suficiente extensión en linderos, proceder con las dimensiones que existan anotando ese dato en observaciones.
- En estos transectos se realiza un censo completo de todos los árboles sin límite diametral.
- Para los elementos lineales no se realiza muestreo de vegetación herbácea, arbustiva, hojarasca y suelo.

Arreglos dispersos o agrupados

La densidad de los árboles a la hectárea determina cómo proceder.

Entre 500 y 900 árboles

Se establecen cuatro UM2 de 20 m de ancho por 25 m de largo (500 m² cada una). Los demás detalles son idénticos al caso del tipo de uso de la tierra "no pastizal" con la misma densidad de árboles.

Entre 300 y 499 árboles

Se establecen dos UM2 de 100 m de ancho por 100 m de largo (1 hectárea cada una). Los demás detalles son idénticos al caso del tipo de uso de la tierra "no pastizal" con la misma densidad de árboles.

< 299 árboles

Se realiza un censo de toda el área bajo ese uso de la tierra. Gracias a la zonificación y el estudio del área de implementación del trabajo en los pasos 1, 2 y 3 de la metodología ya se debería contar con el mapa de esa área para conocer su superficie total. En ese caso, las submuestras de UM3 deberán distribuirse aleatoriamente.

Arreglos mixtos

Se procede con la combinación de las instrucciones por cada tipo de arreglo que se presente.

Medición de carbono según reservorio

La medición del carbono varía según el tipo de reservorio con el cual se trabaja. Aquí identificamos las acciones a tomar para levantar datos en campo por cada reservorio. El Anexo 2 presenta el listado de las herramientas sugeridas según reservorio. Recomendaciones prácticas y una introducción al uso de herramientas puntuales se brinda en Anexo 3.

Los reservorios con los cuales se trabaja son:

- Biomasa aérea (*above-ground biomass* en inglés - AGB), constituida de tronco, ramas y hojas de árboles, arbustos y herbáceas.
- Biomasa subterránea (*below-ground biomass* en inglés - BGB), formada por las raíces gruesas de los árboles.
- Necromasa o madera muerta, a la que se suman troncos de árboles y arbustos muertos en pie o caídos al suelo, ramas caídas hasta los 5 cm de diámetro.
- Hojarasca, es decir todo el material orgánico muerto en distintos niveles de descomposición encima del suelo. Incluye ramas muy finas y hojas, y también raíces muy finas superficiales. Desde los 5 cm de diámetro a menos.
- Suelo: incluye todos los horizontes del suelo desde 0 cm de profundidad y su relevancia se da por la concentración del carbono orgánico (*Soil Organic Carbon* en inglés - SOC)



Biomasa aérea

Distinguimos entre biomasa arbórea, arbustiva y herbácea. El levantamiento de los primeros dos está condicionado por su diámetro que indicará si son admisibles o menos según la unidad muestral en la cual nos encontramos. Las herbáceas se toman en cuenta únicamente en las UM3.

Plantas vivas con DAP mayor a 10 cm:

- Registrar la especie por nombre científico. Es desconocido proceder con la colecta botánica.
- Medir el diámetro del tronco a 1.3 m del suelo (DAP) en cm y registrarlo.
- Realizar la medición de la altura en metros o en ángulos y registrarlos. Eso no aplica si el diámetro es inferior a 5 cm.

Plantas vivas con un DAP incluido entre 2.5 y 10 cm:

- Se identifica cada planta con su nombre común y científico
- Se mide su altura total por estimación visual usando una referencia graduada de 3 metros de alto
- Se mide su circunferencia a 30 cm del suelo, medida en cm con cinta métrica, con una precisión de +/- 1 cm.

Plantas vivas con un DAP inferior a 2.5 cm:

- Se identifica cada planta con su nombre común y científico
- Atención: no se cosecha en el levantamiento de la vegetación en la UM3

Vegetación no arbórea (excluyendo al plátano y bambú)

- Cortar y picar toda la vegetación presente en cada cuadrante y colocarla en una bolsa.
- Pesar la muestra de cada subunidad muestral (peso húmedo).
- Cortar las muestras en trozos más pequeños, mezclarlos bien y pesar alrededor de 100 g. Ponerlo en la bolsa de papel (submuestra).
- Envío a laboratorio para determinar peso seco.

Se recomienda que el envío no se retrase más de un par de días para evitar la formación de hongos que pueden afectar la calidad de las mediciones. Si la vegetación está mojada, no cerrar las bolsas del todo, pues puede marchitarse.

Recursos para la identificación de especies:

- Especies forestales: "Manual para la identificación botánica de especies forestales de la Amazonía peruana. Volumen II. Lima. 261 pp". Enlace: <https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/895>

- Bambú: "Caracterización y clave de identificación de los bambúes en la región nor-oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca)". Enlace: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2987>

Casos especiales

Cacao

Se mide el diámetro a 30 cm del suelo de cada planta con un calibre y su altura se estima "al ojo" por medio de una referencia graduada de por lo menos 3 metros de alto. Se identifica cada planta medida por su variedad.

Café

Se mide el diámetro a 15 cm del suelo de cada planta con un calibre, y su altura se estima "al ojo" por medio de una referencia graduada de por lo menos 3 metros de alto. Se identifica cada planta medida por su variedad. Si la planta ha sido recientemente podada y presenta rebrotes, y a los 15 cm está el tocón que estaba antes de la poda, la medición se hace en los rebrotes (y no en el tocón), siempre y cuando estos midan más de 0.5 cm.

Plátano

Esa herbácea perenne tiene una impresionante capacidad de secuestrar y almacenar carbono, aunque por un tiempo limitado por su corto ciclo de vida. Se colectará la información de la circunferencia de cada individuo a 130 cm del suelo.

Biomasa subterránea

La medición de ese reservorio es una actividad que requiere muchos recursos por lo cual generalmente la biomasa subterránea es estimada de manera indirecta como una fracción de la biomasa aérea a través de ecuaciones y valores de raíz-fusto (*root-to-shoot*) por defecto. En los bosques tropicales mixtos, la relación entre la biomasa aérea y la subterránea es de aproximadamente 4:1; en condiciones muy húmedas la proporción puede aumentar hasta 10:1, mientras que en condiciones secas puede disminuir a 1:1. El IPCC, tomando como base Cairns et al. 1997¹⁰, recomienda utilizar un valor de raíz-fusto de 0,24 para todos los bosques tropicales húmedos, secos y secundarios. Las ecuaciones normalmente pueden ser específicas para una especie concreta o aplicar a plantaciones o bosques.

Si bien no deberían intercambiarse, de faltar es posible aplicar ecuaciones genéricas como la siguiente que se ha construido sobre más de 160 estudios que incluyen la AGB y BGB de bosques nativos tropicales, temperados y boreales: Y (t secas/ha) = $\text{Exp} [-1.0587 + 0.8836 \cdot \text{LN}(\text{AGB})]$ (Cairns et al 1997). Si se quisiera desarrollar valores de raíz-fusto por el área de estudio y el sistema de uso de la tierra considerado, tomar nota de que es un proceso destructivo y que será necesario proceder con los siguientes pasos (2008¹¹):

1. Seleccionar las especies arbóreas a partir de los estratos y unidades muestrales de muestreo para la medición. Seleccionar árboles de diferente DAP o altura, no es necesario que la selección se limite a las unidades muestrales.
2. Cosechar un número seleccionado de árboles para la excavación, unos 30 árboles de diferentes circunferencias.
3. Excavar las raíces hasta 30-50 cm de profundidad, limpiar las raíces de tierra y tomar su peso en fresco.
4. Estimar el peso seco de la biomasa radicular excavada.
5. Medir el DAP, la altura y el peso fresco del fusto.
6. Estimar el peso de la biomasa de los tallos utilizando las ecuaciones de biomasa basadas en el DAP (y la altura).
7. Con los pesos estimados calcular la relación de la biomasa de las raíces con la biomasa del fusto.

“La gran heterogeneidad y los diversos efectos de la gestión sobre los árboles en los paisajes agrícolas limitan el uso de ecuaciones alométricas estándar desarrolladas para los bosques; de ahí la necesidad de desarrollar ecuaciones alométricas robustas y relaciones raíz:fusto para una estimación más precisa de la biomasa subterránea.” Kuyah et al., 2012¹²

¹⁰ Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. et al. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111, 1–11 (1997). <https://doi.org/10.1007/s004420050201>

¹¹ (2008). Methods for Below-Ground Biomass. Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects. N. H. Ravindranath and M. Ostwald. Dordrecht, Springer Netherlands: 149-156

Necromasa o madera muerta

Se miden troncos de árboles y arbustos muertos en pie o caídos al suelo, ramas caídas con longitud mayor a 0.5 m y que corresponden a la clase diamétrica admitida por la UM en la que se está realizando la actividad. Por cada registro medir su longitud y estado de decadencia de 1 a 3, siendo 3 el nivel más avanzado de descomposición. Cuando sea posible, indicar especie o en falta tipo de madera para aplicar una densidad específica.

Hojarasca

Ese reservorio es analizado de manera destructiva colectando la materia orgánica muerta de las subunidades de muestreo UM3. Los pasos que seguir son:

- Recolecta toda la hojarasca encontrada en los cuadrantes de 0.5 m x 0.5 m en dos etapas:
 1. Hojarasca gruesa con diámetros >5 cm y/o 50 cm de longitud. Eso puede incluir: cualquier tipo de necromasa arbórea, material vegetal en descomposición, residuos de cultivos, hojas y ramas que no estén quemadas. Todo ese material se colecta y lleva a un lugar de muestreo específico para su triaje y ulterior muestreo.
 2. Hojarasca fina que se encuentra en la capa orgánica superficial por encima del suelo (0-5 cm), incluyendo raíces. Se aconseja llevar el material recolectado a otro lugar para proceder cómodamente al tamizado que permite separar la hojarasca fina del suelo mineral.

Para minimizar la contaminación de las muestras con suelo mineral, se recomienda poner en remojo las muestras de hojarasca gruesa para lavarlas en agua y recolectar únicamente la materia que flota. Ese material deberá dejarse secar antes de pesarlo. El material remanente será tamizado con un tamiz de 2 mm y añadido a la fracción de hojarasca fina. Para evitar el proceso de lavado se puede también proceder con el proceso de incineración de las muestras en laboratorio.

Se procede a lavar y secar también las muestras de hojarasca fina y las raíces que quedan del tamizado anterior (2 mm). Las muestras así colectadas se envían al laboratorio de análisis.

Suelo

La determinación del carbono en el suelo (SOC) requiere dos medidas:

- El peso del suelo (densidad aparente, es decir peso por volumen).
- La concentración de carbono orgánico en el suelo.

¹² Kuyah, S., J. Dietz, C. Muthuri, R. Jamnadass, P. Mwangi, R. Coe and H. Neufeldt (2012). "Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: II. Belowground biomass." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 158: 225-234.

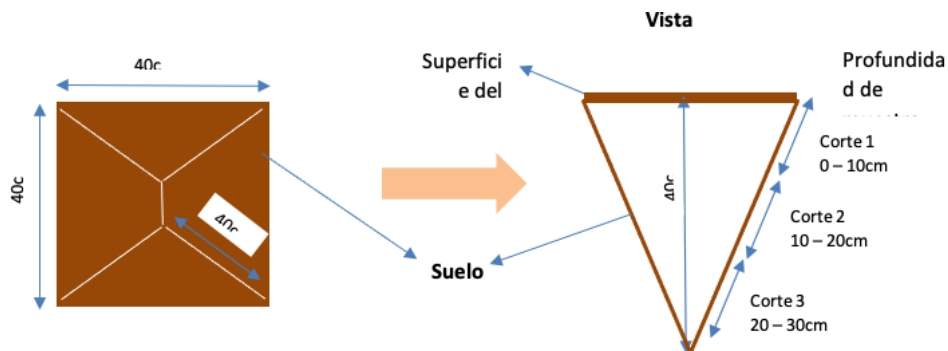
Para cumplir con los requerimientos del IPCC y poder usar esos valores para reportes nacionales e internacionales se muestra entre 0 y 30 cm. Aun así, la evidencia científica muestra como los procesos de almacenamiento de SOC sea un proceso a largo plazo cuya evidencia requiere un muestreo a mayores profundidades para no omitir generar evidencia sobre buena parte de él (van Noordwijk et al 2023). Las profundidades de muestreo serán:

- 0-10 cm
- 10-20 cm
- 20-30 cm
- 30-40 cm
- 40-50 cm

Los pasos para cada punto de muestreo para determinar la concentración de carbono orgánico en el suelo consisten en:

- Preparar la unidad de muestreo removiendo la capa de hojarasca.
- Cavar un agujero de 40 x 40 x 40 cm (Figura 13).
- Retirar un trozo del suelo de un lado del agujero con el machete, entre 0-10 cm de profundidad. Dejar esa muestra dentro de un balde.
- Repetir el proceso entre los 10-20 cm y 20-30 cm de profundidad, y separarlas en los 2 baldes restantes.
- Repetir el proceso en el resto de las submuestras del punto de muestreo.
- De cada balde, transferir 2 lotes de 0.5 kg de suelo a bolsas Ziplock y descartar el resto.
- Enviar las muestras al laboratorio para determinación de SOC.

FIGURA 13 VISTA DESDE ARRIBA Y LATERAL DE UNA SUBMUESTRA DE SUELO



La extracción de las muestras de densidad aparente se define según el tipo de suelo.

Suelos húmedos sin fragmentos gruesos: método del núcleo intacto

1. Se recoge un volumen conocido de suelo mediante un anillo metálico.
2. Si el suelo estuviera muy seco, se puede humedecer manualmente para mantener el núcleo intacto. Eso se hace colocando un bidón sin fondo en el suelo, se llena de agua y se deja en el suelo durante 24 horas.
3. Preparar una superficie horizontal en el suelo con una pala a la profundidad de muestreo.
4. Empujar o martillar suavemente un anillo de acero en el suelo. Puede utilizarse un bloque de madera para proteger el anillo. Evite introducir el anillo demasiado o el suelo se compactará.
5. Excavar alrededor del anillo sin perturbar ni aflojar la tierra que contiene y retirarlo cuidadosamente con la tierra intacta.
6. Retirar el exceso de tierra del exterior del anillo y cortar con tijeras las plantas o raíces que haya en la superficie del suelo.
7. Verter la tierra en la bolsa de plástico y cerrarla.

FIGURA 14 ETAPAS DEL MUESTREO DEL SUELO UTILIZANDO UN ANILLO DE MUESTREO (DE LA ESQUINA SUPERIOR IZQUIERDA A LA ESQUINA INFERIOR DERECHA)



Suelos sueltos, especialmente los superficiales: método de excavación

Aplicar si no es posible el método del núcleo intacto o para suelos con abundantes fragmentos gruesos.

1. Excavar una cantidad de suelo, secarlo y pesarlo, y determinar el volumen de la excavación llenando el agujero con arena de volumen conocido por unidad de masa o agua.
2. La profundidad de la perforación dependerá de la profundidad de la capa evaluada. Toda la tierra excavada debe conservarse en un recipiente para determinar su peso en seco, tal como se describe en el método del testigo inalterado.

Procesamiento de muestras para envío a laboratorio

- Dejar secar las muestras de suelo al aire durante unos días, en un espacio bien ventilado y libre de polvo, a la luz directa.
- Romper los pedazos de arcilla y suelo que esté aglutinado, intentando que las muestras sean lo más uniforme posible, removiendo ramas, raíces y demás materia orgánica visible.
- Colocar las muestras de suelo en bolsas Ziplock rotuladas con el código correspondiente para dar información sobre: fecha de muestreo, profundidad de la muestra, lugar donde fue tomada y estará relacionado con las coordenadas GPS.
- Enviar las muestras de suelo a un laboratorio certificado para análisis de suelo. Los resultados obtenidos se presentarán en porcentaje o g/kg, donde $1\% = 10\text{g/kg} = 0.01 \text{ kg/kg} = 0.01 \text{ Mg/Mg}$.

Limpieza de base de datos

Las mediciones en campo, los resultados de los análisis de laboratorio y las especies identificadas por parte de herbarios especializados se reúnen en una base de datos única, herramienta sobre la cual se fundamenta todo el trabajo de estimación de carbono.

Es fundamental que la base de datos no contenga errores o vacíos en los datos colectados. Para minimizar esa posibilidad, el equipo de gabinete deberá revisar semanalmente la información colectada por el equipo en campo y pedir ajustes, verificaciones y correcciones cuando se considere necesario.

Esa modalidad de trabajo es posible cuando se trabaja con medios de registración de la información digital que permitan el envío de esa información en tiempo casi real, dependiendo de la conectividad del área de implementación. Si ese no fuera el caso, se deberá sistematizar toda la información con la posibilidad de ingresar ulteriores errores. Eso supondrá una carga adicional para el equipo de campo con consecuente ampliación de los tiempos de operación, e incluso tampoco será posible revisar los datos de manera casi paralela con el progreso del trabajo, limitando la posibilidad de proceder con verificaciones.

Análisis de datos

El análisis de carbono incluye varios niveles de cálculo: a nivel de árbol y muestra de suelo, el escalamiento a nivel de unidad muestral, de hectárea y finalmente de paisaje.

Para avanzar se deben tener listos los siguientes insumos:

- Factores de conversión de unidad muestral a hectárea (o km en caso de elementos lineales) (ver Anexo 4) a aplicar a los árboles de cada UM para calcular su contribución sobre 1 ha.
- Para árboles, palmeras y especies herbáceas y arbustivas de particular interés:
 - Ecuaciones alométricas para AGB, específicas y/o genéricas (ver Anexo 5 y GlobAllomeTree)

- Densidad de la madera específica y valor por defecto (0.64 para Perú) Para madera muerta, valores de densidad de madera a aplicar según estado de descomposición.
- Factor de conversión de biomasa a carbono. 0.49 es el valor nacional del Perú.
- Resultados de laboratorio.

Biomasa aérea

Árboles y arbustos (incluye café, cacao, plátano):

1. Calcular las alturas de los árboles medidos si se ha usado un clinómetro o hipsómetro que brinda medidas en ángulos (ver Anexo 3).
2. Calcular la biomasa de cada árbol aplicando las ecuaciones alométricos oportunas (ver Anexo 5).
3. Calcular la biomasa subterránea aplicando a los resultados por defecto o en falta una regresión basada en los resultados de AGB.
4. Convertir los valores obtenidos a toneladas de carbono.
5. Acorde a la unidad muestral de cada árbol, multiplicar los resultados por el factor de conversión correspondiente para llevar los resultados a nivel de hectárea.
6. Calcular el total de carbono por hectárea por unidad muestral. Si una unidad productiva cuenta con varias unidades muestrales, sumar los resultados, manteniendo separado el carbono de la biomasa aérea del carbono de la biomasa subterránea.

Biomasa subterránea

Determinar indirectamente:

Madera muerta

1. Calcular el volumen en cm^3 .
2. Multiplicar el volumen por la densidad de la madera correspondiente al nivel de descomposición para obtener la biomasa.
3. Convertir los valores obtenidos a toneladas de carbono.
4. Convertir los valores obtenidos a toneladas de carbono por hectárea usando los factores de conversión correspondientes según unidad muestral.

Materia orgánica

Eso incluye hojarasca, vegetación herbácea y raíces:

- Se calcula el contenido de humedad de las muestras sustrayendo al peso fresco anotado en campo, el peso seco determinado en laboratorio, y dividiendo por el peso fresco.
- Se calcula la biomasa (gr/cm^2) como el peso fresco menos el peso seco por el contenido de humedad entre 1000.
- Se llevan los resultados a toneladas por hectárea multiplicando el resultado anterior por 10 000.
- Carbono orgánico del suelo: resultados de laboratorio.

Cálculo de las reservas de carbono promediadas en el tiempo para un sistema de uso de la tierra

La determinación del valor típico de las reservas de carbono es posible cuando se reconoce el ciclo de vida del sistema.

En los sistemas de uso de la tierra que están en equilibrio (p.ej. bosques naturales) con respecto a su edad (todas las edades son igualmente probables), las reservas de carbono promediadas en el tiempo coinciden con las reservas promediadas espacialmente cuando se aplique a un paisaje suficientemente grande.

Ese valor típico que se busca debe:

- Representar tanto la media espacial del uso precedente de la tierra (pasado), como tipificar la media temporal del nuevo sistema a lo largo de su ciclo de vida (futuro).
- Ser igual a la suma de ganancias y pérdidas (aprovechamiento) de carbono.

Cuando nos encontramos con sistemas que aumentan su superficie (o las disminuyen), el valor promedio de carbono que le corresponde por unidad de superficie será inferior (o superior) al valor promedio temporal.

Por lo tanto, la pérdida de carbono o el potencial de secuestro de un sistema de uso de la tierra no viene determinado por las reservas máximas de carbono del sistema en un momento dado, sino por el carbono medio almacenado en ese sistema durante su tiempo de rotación (ASB, 1996). Este valor típico de las existencias de carbono se denomina reserva de carbono promediada en el tiempo (*time-averaged* carbono stock en inglés).

En los sistemas agroforestales, a medida de que los agricultores incorporan diversas especies de árboles en sus unidades productivas, esto afectará a las reservas de carbono de forma diferente a los cultivos transitorios o de los bosques. Por ejemplo, los árboles de un sistema agroforestal se cosechan con más frecuencia que en los bosques. También pueden incorporar nuevos árboles en sus unidades productivas en cualquier momento.

Por lo tanto, para extrapolar las reservas de carbono de una unidad productiva a nivel de paisaje se requiere las reservas de carbono promediadas en el tiempo, ya que tienen en cuenta la dinámica del sistema (a nivel de paisaje) que incluye la posibilidad de plantar nuevos árboles y su aprovechamiento, y permite comparar sistemas de uso de la tierra que tienen diferentes patrones en tiempos de crecimiento, y de rotación de los crecimiento y aprovechamiento de los árboles.

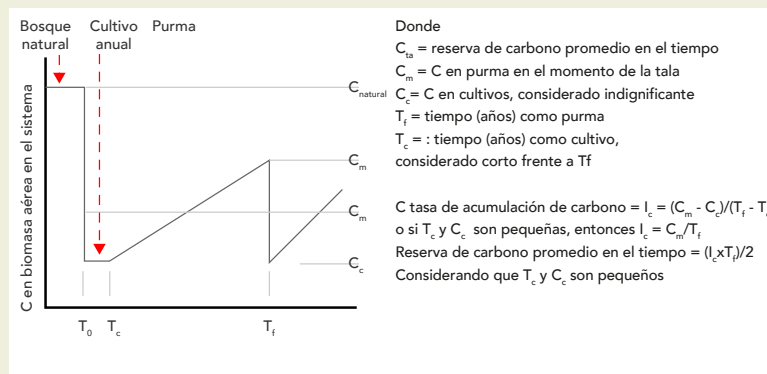
Son cuatro factores que afectan este valor: (a) velocidad de acumulación de carbono, (b) carbono máximo y mínimo acumulado en una rotación (antes de empezar y después de terminar la época de aprovechamiento), (c) el tiempo que tarda en alcanzar el máximo nivel de carbono y (d) el tiempo de rotación del sistema.

Calcular la reserva de carbono promediada en el tiempo

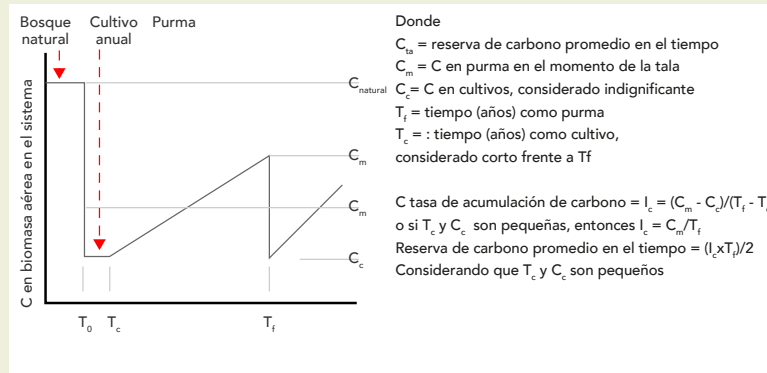
Hemos muestreado las reservas de carbono (Cs). Este valor dividido por la edad de la vegetación en el momento del muestreo (Ts) nos da la tasa de acumulación de carbono (Ic, en MgC por Ha por año).

Tomemos dos escenarios:

- Escenario A: tala del bosque seguida por establecimiento de un sistema cíclico de cultivo – purmas
- Escenario B: tala del bosque y establecimiento un cafetal agroforestal (SAF) o de plantación de árboles.



Escenario A



Escenario B

En el escenario A, la rotación entre cultivo y purma es rápida. Conociendo el momento de la tala (T_f), podemos calcular la cantidad máxima de carbono almacenado (C_m) para la purma al momento de la tala como: $C_m = I_c \times T_f$. Si el valor promediado en el tiempo del carbono almacenado por el sistema de cultivo es demasiado bajo puede ignorarse. Bajo ese escenario el carbono almacenado que se contabiliza es el de la vegetación de la purma en el momento de la tala, dividido por 2, o también puede calcularse como el incremento anual por ellos años de la purma antes de su tala.

En el escenario B, la cantidad máxima de carbono almacenado (Cm) puede haberse alcanzado algunos años antes del año de tala. Si tomamos un cafetal que debería ser remplazado, su máximo almacenamiento de carbono se ha logrado a los 7 años cuando culmina la etapa de establecimiento, y de allí ha empezado a disminuir en la etapa de producción. El ciclo dura 12 años (7+5) y después la plantación será erradicada y replantada. En ese escenario, el valor de carbono promediado en el tiempo se calcula como la media ponderada promediado en el tiempo de cada fase de la rotación.

En la etapa de diseño muestral, se deberá considerar posicionar las unidades muestrales en unidades productivas de múltiples edades (jóvenes, medias, viejas). Una vez levantados los datos, desarrollar ecuaciones de incremento de carbono por edad por cada grupo sobre la base de la sumatoria de los valores obtenidos por todos los reservorios. El valor del incremento anual que nos brinda esa curva multiplicado por el tiempo de rotación del café dividido por dos nos brinda el valor buscado.

Presentación de resultados

Se recomienda generar una hoja de cálculo en la que se puedan presentar los resultados desagregados según reservorio para cada unidad muestral, además de su sumatoria.

A la unidad muestral está asociado un uso o sistema de uso de la tierra, que permite aplicar un análisis estadístico descriptivo para explorar la calidad de los datos. Se recomienda incluir los siguientes indicadores:

- Media
- Mediana
- Mínimo
- Máximo
- Varianza
- Desviación estándar
- Intervalo de confianza

PASO 5

VERIFICACIÓN DE TERRENO Y ANÁLISIS

El quinto paso de la metodología apunta a recolectar información georreferenciada sobre sistemas de uso de la tierra desde las observaciones en el terreno y producir series temporales de mapas de usos de la tierra/cobertura. Para analizar correctamente la configuración espacial de los sistemas de usos de la tierra en un paisaje, se debe hacer referencia a las opciones tecnológicas existentes que van mejorándose y fortaleciéndose con rapidez especialmente en la aplicación de métodos de *deep learning*¹⁹ para la identificación de elementos y procesamiento rápido y automatizado de imágenes de muy alta resolución.

Verificación de la información en el terreno

Se le conoce como *groundtruthing* al proceso de relacionamiento de la información recogida en el terreno con la atribución a los estratos inicialmente definidos (tipos de coberturas) y las propiedades cuantitativas con el objetivo de aumentar la precisión del proceso de interpretación de imágenes. Se divide en calibración y validación, con dos muestras distintas de datos. Es necesario un número suficiente de puntos unidades muestrales georreferenciadas.

Prerrequisitos:

- Lista de tipos de cobertura y sistemas de uso de tierras, clasificación y estratificación/esquemas de zonificación (Paso 2).
- Imágenes satelitales a ser procesadas.
- Mapa de accesibilidad (carreteras y/o ríos).

¹⁹ El *deep learning* en teledetección se refiere a la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje automático para analizar y extraer información de datos obtenidos de forma remota. Esas técnicas han demostrado un rendimiento superior en el manejo de patrones complejos y grandes conjuntos de datos, lo que las hace adecuadas para los diversos desafíos presentados por las aplicaciones de teledetección. Estos avances contribuyen a un análisis más preciso y eficiente de los datos obtenidos de forma remota, facilitando la toma de decisiones mejorada en campos como la agricultura, la silvicultura, la planificación territorial y la gestión de desastres.

Consideraciones:

- Tamaño del área de interés. Más área = más puntos de verificación en el terreno.
- Identificación de los factores que pueden generar variaciones y afectar las firmas espectrales en el área de evaluación, como la topografía.
- Distribución de las unidades muestrales de verificación de manera equitativa entre sistemas de uso de la tierra.
- Variaciones en la estructura de la vegetación entre tipos de cobertura o dentro de cada tipo.
- Evitar zonas con alta concentración de nubes.
- Familiaridad de los intérpretes de imágenes espaciales con la zona.
- Técnicas de interpretación de imágenes satelitales.

Actividades:

- Según el presupuesto, determinar cuántas semanas tomará la verificación en terreno.
- Priorizar áreas peculiares, que no puedan ser reconocidas de manera rápida o con topografía complicada o con cambios subitáneos, todos elementos reconocibles por la firma espectral.
- Estratificar áreas según su topografía y firmas espectrales.
- Determinar cuántos puntos de GPS serán necesarios por cada estrato, tanto para el grupo de calibración como para el de validación.
- Decidir las rutas más eficientes.
- Observaciones de campo.
- Registrar y procesar la data recopilada en campo.

Análisis de imágenes satelitales

El objetivo principal del análisis de imágenes satelitales es producir una serie temporal de imágenes de cobertura/ uso de la tierra a vincularse con los resultados de carbono a través de la tabla de consulta (Paso 2).

Por lo general, los tipos de imágenes disponibles son múltiples, así como los son los detalles y la precisión de la interpretación y la unidad mínima cartografiable. Existen imágenes satelitales de diferentes resoluciones y de libre acceso que son de interés para el Perú. Entre esas las de mediana resolución como Landsat con píxel de 30 m, Sentinel con píxel de 10, 20 y 60 m y las de muy alta resolución de PlanetScope con píxeles de 4.77 m. El uso de imágenes de diferente resolución y fuente puede dar lugar a diferencias de interpretación, especialmente en los márgenes de los estratos o de las clases de cobertura de la tierra. Cuando se utilizan imágenes compuestas a partir de múltiples fechas de observación, no es infrecuente observar diferencias en la interpretación de un paisaje continuo en los bordes de las imágenes fusionadas.

Con respecto a las nubes, en los países del trópico húmedo como el Perú esto puede llegar a representar un problema. Las diferencias de la cobertura de la tierra según la elevación deben tenerse en cuenta.

Objetivos:

- Calificar las firmas espectrales de los tipos de cobertura de la tierra con alta precisión en la serie temporal de las imágenes satelitales.
- Analizar de forma muy precisa los mapas resultantes contra los resultados del proceso de validación.

Prerrequisitos:

- Serie de imágenes satelitales.
- Mapas temáticos (elevación, inclinación, suelo, accesibilidad, etc.).
- Información de validación.

Consideraciones:

- La selección del sensor de imágenes satelitales y plataformas a utilizar. En particular considerar tres tipos de resolución: espacial, espectral y temporal.
- Variaciones estacionales de las imágenes en cada temporada.
- Intervalo temporal de la serie de imágenes.
- Nubes.
- Cambios de cobertura de la tierra en el área evaluada.
- Método de interpretación y softwares.
- Habilidad y experiencia del intérprete y su familiaridad con la realidad en el terreno.
- Disponibilidad de datos de calibración y validación.
- Sistema de clasificación de cobertura de la tierra.

Actividades:

- Elegir el software y metodología para el preprocesamiento e interpretación de las imágenes.
- Preprocesamiento de imágenes, con corrección geométrica y atmosférica.
- Interpretación y clasificación de imágenes de manera manual o automática.
- Cálculo de la exactitud de la evaluación de las imágenes procesadas.
- Cálculo de áreas de cada tipo de cobertura de la tierra dentro de los estratos/zonas.

Análisis de los cambios

Las áreas de cambio para cada posible transición entre los tipos de cobertura de la tierra a lo largo del tiempo se calculan a partir de las series temporales de los mapas de cobertura de la tierra de pared a pared que cubren completamente la región de interés.

Esas áreas deben calcularse por cada estrato/zona de capas de tipos abióticos y de manejo. Esto debería seguir una serie sencilla de pasos técnicos que impliquen la interpretación de imágenes de satélite y el análisis espacial. El resultado es una matriz de transiciones de uso/cobertura de la tierra de tamaño $n \times n$, donde n es el número de tipos de uso/cobertura de la tierra encontrados.

TABLA 3 EJEMPLO DE MATRIZ DE TRANSICIONES HIPOTÉTICAS DE USO/COBERTURA DE LA TIERRA

2005 2000	Bosque primario	Bosque interve- nido	Planta- ción de pino	Palma aceitera	SAF café complejo	SAF café simple	SAF cacao comple- jo	SAF cacao simple
Bosque primario	15	-	3	7	-	1.5	-	0.7
Bosque intervenido	-	22	1	7	-	1.5	-	0.7
Plantación de pino	-	-	3	-	-	-	-	-
Palma aceitera	-	-	-	7	-	-	-	-
SAF café complejo	-	2	-	-	11	6	-	-
SAF café simple	-	-	-	-	3	18	-	-
SAF cacao complejo	-	-	-	-	-	-	9	2
SAF cacao simple	-	-	-	-	-	-	5	5

PASO 6

ESCALAMIENTO

Con ese último paso metodológico se busca escalar la información del nivel de unidad muestral a paisaje para obtener un mapa de carbono por toda al área de interés. Ese mapa, si fue sólidamente construido en todos los pasos anteriores, representa una herramienta robusta para caracterizar el impacto del cambio climático en la implementación de las CUSAF a escala de paisaje, permitiendo priorizar áreas donde es posible encontrar más carbono que otras con menor impacto.

Ese paso debe considerarse como opcional de cara al seguimiento de las contribuciones individuales de cada contrato, siendo necesario un registro detallado de los usos y sistemas de uso de la tierra iniciales al momento del otorgamiento, y de los cambios en el tiempo ya que las condiciones bajo las cuales se rigen estos contratos apuntan a modificar trayectorias de cambio de la tierra y duración de ciclos de barbechos y purmas.

Aun así, si se quisiera realizar ese último paso, estos son los elementos a calcular:

- Matriz de transiciones entre usos/coberturas de la tierra en proporciones. Eso significa que la suma de todas las proporciones de cada zona debe ser 1. El resultado no tiene unidad.
- Proporción de cada zona por análisis espacial. La suma de todo el paisaje es 1. El resultado no tiene unidad.
- Área total del paisaje por análisis espacial y en hectáreas.
- Carbono promediado en el tiempo para cada sistema de uso de la tierra (Mg/ha) según el Paso 4.
- Cambios en las reservas de carbono para cada cambio. Eso se obtiene multiplicando cada celda de la matriz de cambio por la diferencia en el promedio de carbono en el tiempo por cada transición/conversión y luego por 44/12 (factor de conversión). El resultado es en Mg/ha de CO₂ equivalente.
- Cambios anuales en las reservas de carbono por cada transición. Se obtiene al dividir los cambios entre la duración del periodo de estudio. (Mg/ha/año de CO₂ equivalente).
- Emisiones y secuestros anuales totales y cambios netos en las reservas de carbono en el paisaje (Mg/año de CO₂ equivalente).
- Proporción de emisiones y secuestro resultante de cada transición (sin unidad o porcentual).
- Mapa de densidad de carbono por análisis espacial (Mg/ha de CO₂ equivalente).
- Mapa de emisiones de carbono por análisis espacial (Mg/ha/año de CO₂ equivalente).

La información obtenida se puede presentar de diversas maneras como diagramas o tablas, sin embargo, hacerlo en mapas permite una visualización más práctica y comprensiva.

ANEXOS

1. Selección de herramientas

Identificación de herramientas

Como punto de partida para explorar la disponibilidad de herramientas para CUSAF se han usado las recopilaciones de herramientas de Deneff et al. (2012) Colomb et al. (2013); Kätsch and Osterburg (2016), Torres et al. (2017); Toudert et al. (2018), Meryl (2018), y Ciniro et al. (2021) y las páginas web de IRD, de USDA y de NDC Partnership como fuentes principales. La lista de herramientas ha sido completada a través de una búsqueda en el navegador de Google de palabras claves según las posibles combinaciones (Figura 16), resultando en el listado de Tabla 4.

FIGURA 16 PALABRAS CLAVES PARA BÚSQUEDA DE HERRAMIENTAS EN GOOGLE

On-fam	+	Carbon stock	+	Assessment	+	Tool
Landscape		Carbon		Quantification		Methodology
Landbased		GHG				

TABLA 4 HERRAMIENTAS DISPONIBLES PARA EL SECTOR AGRICULTURA Y FORESTAL A FEBRERO 2021

Nombre	Desarrollador	Enlace
Accounting for natural climate solution	Quantis	https://quantis-intl.com/report/accounting-for-natural-climate-solutions-guidance/
Avoided conversion of grassland and shrublands to crop production	American Carbon Registry	https://americancarbonregistry.org/carbon-accounting/standards-methodologies/methodology-for-avoided-conversion-of-grasslands-and-shrublands-to-crop-production/acr-acog-2-0_2019-10.pdf
Compost additions to grazed grasslands	American Carbon Registry	https://americancarbonregistry.org/carbon-accounting/standards-methodologies/methodology-for-greenhouse-gas-emission-reductions-from-compost-additions-to-grazed-grasslands/compost-additions-to-grazed-grasslands-v1-0.pdf
AFD C footprint tool	Agence Française de Développement (France)	Discontinuado, no accesible
AFOLU carb	USAID, Winrock International (USA)	http://www.afolucarbon.org/
AgreCalc	Scottish Government, Farm Advisory Service	https://www.agrecalc.com/
ALCIG - Agricultural Life Cycle Inventory Generator	Quantis	https://alcig.quantis-software.com/#/tool
Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM)	APSIM initiative	https://www.apsim.info/
Agriculture Guidance	Initiative for Climate Action Transparency	https://climateactiontransparency.org/icat-toolbox/policy-assessment-guides/agriculture-sector/
Agri-LCI models	Cranfield University	https://www.agri-footprint.com/
ALU	Natural Resource Ecology Laboratory Fort Collins, Colorado (USA)	https://www.nrel.colostate.edu/projects/alusoftware/home/

Nombre	Desarrollador	Enlace
AR-TOOL12 (madera muerta y hojarasca)	Clean Development Mechanism	https://cdm.unfccc.int/Reference/tools/index.html
AR-TOOL14 (árboles y arbustos)	Clean Development Mechanism	https://cdm.unfccc.int/Reference/tools/index.html
Biograce calculator v4b	Institute for Energy and Environmental Research (IFEU)	https://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/overview
BEATv2 - Biomass environmental assessment tool	Defra, the Biomass Energy Centre and the Environment Agency	https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/ftth/biomass-energy-resources/reference-biomass/documents-downloads/beat/
C- Plan		Discontinuado, no accesible
CALM calculator	Country Land and Business Association (UK)	Discontinuado, no accesible
Cap2er	IDELE (Fr)	https://cap2er.fr/Cap2er/ ; http://idele.fr/services/outils/cap2er.html
Carbon Benefits Project Calculator	GEF/United Nations Environment Programme / Colorado State University (CSU)	https://cbp.nrel.colostate.edu/
Carbon Farming Group Calculator	Carbon Farming Group (CFG)(NZ)	https://www.carbonfarming.org.nz/calculators/
CAR - Livestock	Climate Action Reserve (CAR)	http://www.climateactionreserve.org/how/proto-cols/us-livestock/dev/
CAR - Soil enrichment	C Climate Action Reserve (CAR)	http://www.climateactionreserve.org/how/protocols/soil-enrichment/
CAR - Avoided Grassland Conversion	Climate Action Reserve (CAR)	https://ccaafs.cgjar.org/resources/tools/ccaafs-mot-mitigation-options-tool-agriculture
Carbon Trust Footprint Expert	Carbon Trust	https://www.carbontrust.com/es/node/1021
CAT - AR	World Bank, integrado en AFOLU carb	

Nombre	Desarrollador	Enlace
CAT - SFM	World Bank, integrado en AFOLU carb	
CCAFS - MOT	CGIAR CCAFS	https://ccafs.cgiar.org/resources/tools/ccafs-mot-mitigation-options-tool-agriculture
CCT	USDA, Forest Service and U.S. EPA	http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/2394
Century/DayCent	Colorado State University	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/daycent/
Climagri	T. Eglin, S. Doublet, L. Galsomès, E. Martin, S. Martin, A. Trévisiol y J. Mousset	http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5664
Cole calculators	National Council for Air and Stream Improvement and the USDA Forest Service,	https://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/cole-carbon-online-estimator
COMET - FARM	USDA, NRCS and CSU, NREL	http://comet-farm.com/
CoolFarmTool	Unilever and University of Aberdeen (UK)	https://coolfarmtool.org/
¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?	Andrade H.J., Ibrahim M. (CATIE)	https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6950
C-Plan	Drew and Jan Coulter	Discontinuado
CQESTR	USDA	https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/pendleton/columbia-plateau-conservation-research-center/docs/cqestr/
CTCC - CUFR Tree Carbon Calculator	USDA Forest Service	https://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/cufr-tree-carbon-calculator-ctcc
CVPLAN v2		No disponible

Nombre	Desarrollador	Enlace
DairyMod and SGS models	IMJ Consultants	http://imj.com.au/
DGAS	Diary Australia	https://www.dairyingfortomorrow.com.au/tools-and-guidelines/dairy-greenhouse-gas-abatement-calculator/
Dia'Terre	ADEME	https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/dia-terre
DNDC	Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire (USA)	https://www.dndc.sr.unh.edu/
Estimación de emisiones de GEI en la agricultura	FAO	https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiV2d3pn8_wAhViHrkGHSUTC3sQF-jAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fao.org%2Fclimatechange%2F42726-0916f811ec1c-96f58db3555f0361732f7.pdf&usg=AOvVaw1sVZH-qkzKEAw9n-XKrynyX
EX-ACT	FAO	http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/en/
Farm Carbon Toolkit	Farm Carbon Toolkit	https://farmcarbontoolkit.org.uk
FarmGAS	Australian Farm Institute	http://calculator.farminstitute.org.au/login
Farming Enterprise GHG Calculator	Queensland University of Technology Institute for Sustainable Resources	https://research.qut.edu.au/sae/resources/calculators/farming-enterprise-greenhouse-gas-emissions-calculator/
Farmscoper Model	R. Gooday, S. et al.	http://www.adas.uk/Service/farmscoper
Fieldprint calculator	Field To Market, The Keystone Alliance for Sustainable Agriculture	https://www.fieldtomarket.org/fieldprint-calculator/
Full Lands Integration Tool (FLINT)	Moja Global	https://moja.global/flint/

Nombre	Desarrollador	Enlace
FSGGEC	Michigan State University, and Queensland University of Technology	http://surf.kbs.msu.edu/
FullCAM	Australian Government	https://www.industry.gov.au/data-and-publications/full-carbon-accounting-model-fullcam
FVS - CarbCalc	USDA, Forest Service	https://www.fs.fed.us/fvs/
G-SOC MRV	FAO	www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/eighth_PA/GSOC_MRV.pdf
GEFSOC	GEF	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/gefsoc/download_information.htm
GLEAM	FAO	http://www.fao.org/gleam/es/
GoldStandard (soil)	Gold Standard	https://globalgoals.goldstandard.org/standards/402_V1.0_LUF_AGR_FM_Soil-Organic-Carbon-Framework-Methodolgy.pdf
Grassgro and AusFarm	CSIRO	https://grazplan.csiro.au/
Greenhouse in agriculture tools frameworks (grains,dairy, beef, sheep)	University of Melbourne (AU)	http://www.greenhouse.unimelb.edu.au/Tools.htm
Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales	World Agroforestry Centre/Consortio Iniciativa Amazónica	https://www.worldagroforestry.org/publication/guia-para-la-determinacion-de-carbono-en-pequenas-propiedades-rurales
HGCA biofuels GHG calculator	Imperial College, (UK)	No disponible
Holos	Agriculture and AgriFood Canada	https://ndcpartnership.org/toolbox/holos
IFSC - Illinois Farm Sustainability calculator	McAvoy, Peter; Marten, Timothy; Petri, Aaron C.	

Nombre	Desarrollador	Enlace
International wine carbon calculator	Provisor Pty Ltd	https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/13458
2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories	IPCC	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/
i-Tree Canopy	USDA Forest Service	https://canopy.itreetools.org/references
i-Tree Harvest Carbon Calculator	USDA Forest Service	https://harvest.itreetools.org/
JRC Carbon Calculator	Nicolas METAYER, Jean-Luc BOCHU Joint Research Centre - IES	https://solagro.org/nos-domaines-d-intervention/agroecologie/carbon-calculator
Lincoln Farm Carbon Calculator	Lincoln University (New Zeland)	https://dotnetrest.lincoln.ac.nz/O365flowClient/cache/sites/www-content/Lincoln%20WWW/research/research/rc/aeru/carbon-calculator/CarbonCalculator.html
MANURE	Eastern Research Group, Inc. and ERT Winrock International	No disponible
MELODIE	Chardo et al.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731112000687#!
MiLa	Peter et al.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16305662
Mitigation Goal Standard	Greenhouse Gas Protocol	https://ghgprotocol.org/mitigation-goal-standard
Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1)	FAO	https://www.fao.org/documents/card/en?details=CA2934EN/

Nombre	Desarrollador	Enlace
NDFU	North Dakota Farmers Union Carbon Credit Program	Discontinuado, no accesible
Nori	Nori Inc	https://nori.com/resources/croplands-methodology
Organic farmer carbon calculator	N-A	No disponible
Overseer	MAF, FertResearch and AgResearch (NZ)	https://www.overseer.org.nz/our-model
Policy and Action Standard	Greenhouse Gas Protocol	https://ghgprotocol.org/policy-and-action-standard
RACSA	World Agroforestry	https://www.worldagroforestry.org/publication/rapid-carbon-stock-appraisal-racsa-0
RAPCOE	Duke University/Stratus Inc	No disponible
RFA – RTFO carbon calculator V1	UK Government. Dep. to de transporte	https://www.gov.uk/government/publications/biofuels-carbon-calculator-rtfo
Roth-C	Rothamsted Research	https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc
RSB Tool	Roundtable on Sustainable Biomaterials (Swiss)	https://rsb.org/services-products/ghg-calculator/
SAMPLE	CGIAR - CCAFS	https://samples.ccafs.cgiar.org/
Shamba	PlanVivo	https://www.planvivo.org/Handlers/Download.ashx?IDMF=5b30948b-26f3-4d7a-803f-0fccc593acbd
TARAM	World Bank Carbon Finance Unit	https://taram.software.informer.com/
The BigChain Tool	South Pole Group	https://openforests.com/project/bigchain-tool-south-pole-group-worldwide/
VCS	Varios	https://verra.org/project/vcs-program/methodologies/methodology-catalog/

Caracterización de herramientas

La caracterización de las herramientas encontradas ha sido posible usando los criterios definidos por Colomb et al. (2012, 2013) complementados y adaptados al caso específico requerido de interoperabilidad y alineamiento con las directrices del IPCC 2006. Esos criterios son:

- **Área geográfica** relativa al tipo de clima (templado, tropical, subtropical, semiárido, boreal) o al país al que se puede aplicar la herramienta.
- **Objetivo:** incluye sensibilización, elaboración de informes, evaluación de proyectos, y calculadoras orientadas al mercado y a los productos.
- **Ámbito de aplicación** que se refiere al enfoque de la herramienta para el cual se evalúa, como toda la finca (ACV), multiactividad, productos básicos, procesamiento en la explotación.
- **Público objetivo**, indicando si la herramienta se dirige a productores de agricultura de subsistencia a pequeña escala, a sus proveedores de asistencia técnica o a los responsables de la toma de decisiones, como los responsables políticos y los promotores de bajas emisiones a nivel regional.
- **Aplicabilidad:** local, nacional, regional o mundial.
- **Actividades incluidas** (alcance): el conjunto de prácticas de gestión sostenible del suelo, ganadería, uso de la energía, transformación y transporte.
- **Escala:** se puede utilizar a nivel de parcela, de finca, de departamento, de país o de paisaje²³.
- **Fuentes contabilizadas:** AGB, BGB, SOC, emisiones entéricas y de estiércol, quema de biomasa, consumo de energía, emisiones fuera de la explotación.
- **Alineamiento con directrices IPCC 2006:** en específico, con "Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura" de IPCC 2003 para UTCUTS. Se mantiene referencia al IPCC 2006 para los otros elementos de AFOLU.
- **Requisitos de datos**, ya sean iniciales o intermedios que pueden ser cualitativos y cuantitativos, y su accesibilidad.
- **Disponibilidad:** relativo al tipo de licencia (código abierto o de pago) y los costes asociados.
- **Requisitos de tiempo** para completar el análisis. El autor señala que esto es muy sensible a las habilidades del usuario, el nivel de precisión, la fiabilidad y la disponibilidad de los datos.
- **Habilidades necesarias:** se refiere al alcance de los conocimientos y habilidades específicas requeridas para ejecutar el análisis más allá de lo que se considera básico de evaluación (es decir, realizar un análisis básico de GEI, utilizar métodos cualitativos para recopilar información).

²³ Entendido como agregación de unidades productivas.

Parámetros de selección

Para poder avanzar en la selección de las herramientas que sirven al objetivo de este documento, se han identificado por cada criterio las condiciones que deben satisfacer (parámetros) para que puedan ser preseleccionadas y evaluadas. Esto se ha hecho tomando en cuenta el ámbito de implementación de CU-SAF y el sistema de MRV existente al cual se debe hacer referencia.

TABLA 5 PARÁMETROS DE SELECCIÓN

Criterio	Parámetro seleccionado	Notas
Área geográfica	Tropical; Perú	
Objetivo	Elaboración de informes para CMNUCC	Reporte de sobre mitigación de CUSAF
Aplicabilidad	Local	Inicialmente local con posibilidad de escalamiento nacional.
Ámbito de aplicación	Multi-actividad	Actividades a pequeña escala relacionadas con manejo forestal y agronómico, entre las cuales la agroforestería
Alcance	Prácticas de manejo sostenible	Sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, plantaciones forestales a pequeña escala.
Escala	Finca y paisaje	Entendido como agregación de unidades productivas
Público objetivo	Responsables de la toma de decisiones	En calidad de equipos técnicos
Disponibilidad	Sin restricciones	De preferencia de licencia gratuita para asegurar continuidad en la implementación
Requisitos de datos	Nivel básico y/o intermedio	Basado en la disponibilidad de información pública y accesible
Requisitos de tiempo	Generación de información rápida y/o intermedia	Para asegurar generación de información en cumplimiento de en los intervalos de reporte establecidos
Habilidades necesarias	Intermedias	Equipos técnicos con nivel intermedio de conocimientos de contabilización de GEI y SIG asociado al contexto productivo agrícola y forestal
Fuentes contabilizadas	AGB, BGB, Necromasa, hojarasca, SOC	Opcional: quema de biomasa

Dos puntos sobre el alcance establecido por esta propuesta metodológica merecen una aclaración específica:

- El suelo es ampliamente reconocido como el mayor sumidero de carbono terrestre. A raíz de esto, es clave poder dar evidencia del impacto de las prácticas agrícolas en el carbono orgánico del suelo. La falta de información y los costos de medición y análisis elevados representan barreras mayores a su inclusión en cualquier sistema MRV. En el ámbito de esta propuesta metodológica, se opta por hacer hincapié en suelo por ser información crucial para la definición de las estrategias de mitigación a todo nivel, aunque a nivel informativo y opcional, y no como enfoque primario.
- Entre las actividades relacionadas con el manejo forestal y agronómico se encuentran fuentes emisoras de GEI vinculadas a procesos de transformación *in situ* de los productos como en el caso de cacao y café. La exclusión de dichas fuentes del sistema nacional de MRV se debe a un proceso de priorización de las categorías nacionales de reporte basado en la información existente, precluyendo así la posibilidad de visibilizar los impactos en emisiones de procesos a pequeña escala faltantes estimaciones específicas, a pesar de su extensión. La generación de dicha información permitiría informar el proceso de priorización de las categorías de reporte y así poder evaluar sobre bases más concretas la participación de estos procesos en el balance nacional de GEI. A raíz de esto, se reportan las herramientas que permiten abordar esta temática como referencia para un trabajo futuro de mejora de la información, también como aportación suplementaria al enfoque principal de UTCUTS.

Preselección de herramientas

La preselección de las herramientas se basa en un primer ejercicio de caracterización sobre la base de los criterios establecidos en la sección anterior, y es finalizada a través de una evaluación de las características intrínsecas de cada una.

Para cada herramienta se ha mirado su alcance geográfico (clima y países). De las 100 iniciales, 20 herramientas cumplen los criterios de área geográfica y objetivos. De estas se ha establecido la tipología correspondiente (Tabla 6).

TABLA 6 HERRAMIENTAS PRESELECCIONADAS POR SU ALCANCE GEOGRÁFICO Y OBJETIVO

Nombre		Área geográfica	Objetivo	Tipología
Accounting for natural climate solution		Global	x	
AFOLU carb*		Global	v	Calculadora
Agriculture guidance		Global	v	Lineamientos
ALCIG		37 países incluido Perú	x	
APSIM		Múltiples países	x	
Agri-LCI models		Global	x	
ALU		Global	v	Calculadora
Carbon Benefits Project calculator		Global	v	Lineamientos
Carbon Trust Footprint Expert		Global	x	
CCAFS - MOT		Global	v	Calculadora
¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?		Global	v	Protocolo
MDL	Tool for estimation of change in SOC stocks due to the implementation of A/R CDM project activities. AR-TOOL12 (madera muerta y hojarasca) TOOL13 (compostaje) TOOL16 (biomasa) AR-TOOL14 (árboles y arbustos)	v	v	Protocolo
CoolFarmTool		Global	x	
EX-ACT		Global	v	Calculadora
Estimación de emisiones de GEI en la agricultura		Global	v	Protocolo

* Incluye CAT-AR y CAT-SFM

Nombre	Área geográfica	Objetivo	Tipología
Farmscoper Model –	Reino Unido/global	x	
FAOSTAT	Global	v	Calculadora
Field Measurements for Forest Carbon Monitoring. A Landscape-Scale Approach	Global	?	Protocolo
Fieldprint calculator	EE.UU. + Global (?)	x	
FLINT	Global	x	Calculadora
G-SOC MRV	Global	x	Protocolo
GEFSOC	Global	x	
GLEAM	Global	x	
Gold Standard	Global	x	Protocolo
Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales	Global	x	
Mitigation Goal Standard	Global	v	Lineamientos
Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1)	Global	v	Lineamientos
Policy and Action Standard	Global	v	Lineamientos
RACSA	Global	v	Protocolo
SAMPLE - Methods for measuring GHG balances and evaluating mitigation options in SH agriculture	Global	v	Protocolo
TARAM	Global	x	
The BigChain Tool	Global	x	

	Nombre	Área geográfica	Objetivo	Tipología
VCS	VM0007 REDD+ Methodology Framework	Global	v	Protocolo
	VM0042 Methodology for Improved Agricultural Land Management			
	VM0017 Adoption of Sustainable Agricultural Land Management			
	VM0021 Soil Carbon Quantification Methodology			
	VM0022 Quantifying N2O Emissions Reductions in Agricultural Crops through Nitrogen Fertilizer Rate Reduction			
	VM0009 Methodology for Avoided Ecosystem Conversion			
	VT0005 Tool for measuring aboveground live forest biomass using remote sensing			
	Toolkit of methodologies (VMD0021, VMD0022, VMD0023, VMD0024, VMD0025, VMD0029, VMD0031, VMD0034)			
Toolkit of methodologies (VMD0001, VMD0002, VMD0003, VMD0004, VMD0013, VMD0015)				

Las metodologías de MDL, VCS y Gold Standard establecen protocolos de reporte para intervenciones a nivel de proyecto para la emisión de bonos de carbono. Si bien su objetivo difiere del propuesto por este documento, se ha decidido mantenerlas en la primera ronda de selección porque aportan metodologías de estimación de emisiones y secuestro de carbono robustas y por esto resultan ser referencias válidas, aunque diferentes en cuanto su objetivo.

No ha sido posible acceder a la información relativa a “Field Measurements for Forest Carbon Monitoring. A Landscape-Scale Approach” por lo tanto esta herramienta queda excluida.

Finalmente, de las que cumplen con alcance geográfico y objetivo, cinco son lineamientos que proponen enfoques y guía para proceder con las estimaciones, pero no una metodología en sí. Si bien se excluyen del ulterior análisis, se consideran como marcos conceptuales válidos a los que podemos referirnos para el trabajo técnico.

Las herramientas seleccionadas se filtran sobre la base de su aplicabilidad a nivel local. Si ese criterio no es satisfecho, la herramienta no se caracteriza como en el caso de CCAFS-MOT, estimación de emisiones de GEI en la agricultura y FAOSTAT no se procede con la caracterización.

TABLA 7 CARACTERIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SOBRE PARÁMETROS DE SELECCIÓN (1)

Nombre	Ámbito	Alcance			Escala		Público	Alineado con IPCC 2006	Disponibilidad
		SAF	SSP	Pl. For.	Finca	Paisaje			
AFOLU carb	v	v	v	v	v		v	v	Libre
ALU	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre
Carbon Benefits Project calculator	v	v	v		v	v	v	?	Libre
¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los SPS?	v		v				v	?	Libre
EX- ACT	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre
FLINT	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre
G-SOC MRV	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre
Measuring and modelling SOC [...] FAO	v		v		v	v	v	v	Libre

Nombre	Ámbito	Alcance			Escala		Público	Alineado con IPCC 2006	Disponibilidad
		SAF	SSP	Pl. For.	Finca	Paisaje			
RACSA	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre, de pago
SAMPLE	v	v	v	v	v	v	v	v	Libre

TABLA 8 CARACTERIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SOBRE PARÁMETROS DE SELECCIÓN (2)

Nombre	Requisitos	Tiempo	Habilidades	Fuentes UTCUTS					Otras fuentes	
				AGB	BGB	DWD	hoja-rasca	SOC	Otras	
AFOLU carb	B	B	B	v						v
ALU	A	A	A	v						
Carbon Benefits Project calculator	B, M, A	B, M, A	B, M, A	v	v		v	v		
¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los SPS?	M, A	M, A	M, A							
EX- ACT	M	M	B	v				v	v	
FLINT	A	A	A	v				v		
G-SOC MRV	A	L	A					v		
Measuring and modelling SOC [...] FAO	M, A	M, A	M, A					v		
RACSA	A	A	M	v		v	v	v	v	v
SAMPLE	A	A	M	v		v	v	v	v	v

Nota: B = bajo/rápido/básicas; M = intermedio/medio/intermedias; A = alto/lento/avanzadas.

Evaluación de las características

De las 10 herramientas preseleccionadas sobre la base de la aplicabilidad, todas cumplen con la mayoría de los parámetros considerados (Tabla 2 y Tabla 3). Las primeras 5 son calculadoras que cuentan con la posibilidad de utilizar factores de emisión por defecto o proveídos por el usuario.

- EX - ACT es una herramienta que se adapta bien para evaluaciones previas a la implementación de un proyecto, pero no tiene el nivel de detalle suficiente para dar seguimiento a un universo de intervenciones a pequeña escala como las CUSAF.
- AFOLU carb propone diferentes niveles de aplicabilidad en cuanto a escala, llegando a incluir hasta el nivel provincial y permitiendo al usuario cargar su propia información espacial para construir la base de datos de superficies consideradas. Sus debilidades son principalmente dos: 1. No permite modificar los parámetros asociados con las categorías de uso de la tierra considerados (p.ej. agroforestería multiestrato, agroforestería protectora) lo que reduce la representatividad en el caso de los usos de la tierra que pueden encontrarse bajo CUSAF; 2. En la parte que corresponde a insumos, no es posible considerar más de uno a la vez, reduciendo así la representación de la realidad a campo en las emisiones de GEI.
- En cuanto al Carbon Benefits Project calculator, este presenta tres niveles de análisis, del más simple al más complejo, según las necesidades del usuario. El más complejo debería ser un modelo con enfoque específico sobre suelo, pero al momento no resulta disponible al enlace propuesto en la herramienta. Tanto el nivel intermedio como el más simple no parecen funcionar correctamente y se cuelgan en la parte de cálculo, por lo que se descartan.
- La herramienta ALU es la más completa y, al mismo tiempo, la más compleja de las cuatro. Es usada para la recopilación de inventarios de GEI y se basa en las directrices del IPCC, lo que asegura un cumplimiento de los requisitos de transparencia, comparabilidad, consistencia, integridad y exactitud. Permite un nivel de personalización muy elevado que sirve al caso de los mosaicos productivos a pequeña escala donde se implementan CUSAF. Cabe mencionar que eso llega, pero al costo de una demanda muy alta en: 1. Conocimientos de inventarios de cambio climático, de factores de emisión y de las prácticas a campo, 2. Datos de actividad sobre UTCUTS (y si se considera pertinente también puede usarse para ganadería), 3. Tiempo.
- FLINT es una plataforma para apoyar el MRV construida según las directrices del IPCC para implementar y operar sus sistemas (nacionales) para estimar las emisiones (y otras métricas) para el sector UTCUTS. FLINT integra datos procedentes de la teledetección de las observaciones en tierra y de otras fuentes para estimar los flujos y las existencias de GEI en diferentes reservorios, y permite mejoras en la calidad de la información usada en el tiempo. En 2018, el Perú ha sido capacitado sobre la plataforma y ha sido uno de los países participantes que ha priorizado su implementación.

Las otras cinco son lineamientos y guías complementadas por protocolos para el diseño del muestreo y el levantamiento de datos para la cuantificación de la biomasa y del SOC y de las emisiones GEI a campo.

- **RACSA** brinda una evaluación costo-efectiva y de corto plazo (en 6 meses) para proporcionar datos fiables sobre las reservas de C en un paisaje definido, sus cambios históricos y el impacto del cambio de uso de la tierra en curso sobre las emisiones previstas. Además, su meta es más amplia aún, ya que busca identificar los principales problemas en las disyuntivas entre las reservas de C y los medios de vida y las oportunidades para lograr vías de desarrollo más sostenibles, mejorando la comprensión entre las partes involucradas.
- SAMPLE propone líneas guía reunidas en un manual para informar el proceso de levantamiento de datos sobre fuentes y sumideros GEI agrícolas, con una atención particular a pequeños productores en países en desarrollo tropical. Es muy completo en términos de criterios que considerar y propone múltiples protocolos de levantamiento de datos.
- G-SOC es específica para el MRV de los cambios en las reservas de SOC y las emisiones/absorciones de GEI de los proyectos agrícolas que adoptan prácticas de gestión sostenible del suelo (SSM) a nivel de finca. Provee un marco conceptual que permite establecer un sistema MRV que pueda ir creciendo en el tiempo en alcance y precisión. Considera la prioridad de aclarar el marco regulatorio e institucional como primer paso para poder abordar un MRV eficiente para luego abordar elementos más operativos como costos y capacidades técnicas que pueden ir aumentando paulatinamente con la calidad de la información generada (Ciniro et al., 2021).
- SAMPLE propone líneas guía reunidas en un manual para informar el proceso de levantamiento de datos sobre fuentes y sumideros GEI agrícolas, con atención particular en pequeños productores en países tropicales en desarrollo. Es muy completo en términos de criterios a considerar y propone múltiples protocolos de levantamiento de datos.
- **"¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?"** Propone una metodología para cuantificar el almacenamiento y la fijación de carbono en sistemas silvopastoriles.
- **Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment** (Version 1) tiene como objetivo introducir un enfoque internacional armonizado para medir y modelizar las reservas de carbono del suelo, y los cambios en las reservas de los pastizales y praderas, de modo que las evaluaciones ambientales de las cadenas de suministro ganaderas también tengan en cuenta el secuestro o las pérdidas de carbono.

Selección de herramientas

SAMPLE y RACSA proponen un enfoque y consideraciones muy parecidas. El análisis propuesto por ambas herramientas incluye un procesamiento de teledetección y un análisis de series temporales. Existen herramientas *ad-hoc* y de licencia gratuita como Collect Earth, ya precedentemente evaluado para una posible aplicación en el contexto amazónico en mérito a sistemas silvopastoriles (Suber, Arango, Torres, & Rosenstock, 2021) y ya aplicado para las estimaciones sobre degradación de bosques por el PNCBMCC que pueden usarse para reducir costos y tiempos. De las dos, se propone seguir RACSA porque no se enfoca únicamente en fuentes y sumideros GEI agrícolas.

RACSA además incluye un protocolo sobre suelo. Para ese reservorio se descarta el uso de G-SOC por la gran cantidad de información requerida para levantar la línea de base, actualmente no disponible. Recolectar esa información, requiere encuestas que incluyan una cantidad de detalles muy elevada sobre los aspectos relacionados con el manejo de las áreas evaluadas. Esa condición podría verse frustrada por la disponibilidad de recursos. La inclusión del reservorio suelo en las evaluaciones de carbono incide fuertemente en la necesidad de recursos. A raíz de eso, prefiere limitar el análisis a lo que es indicado por RACSA, enfocado y restringido al muestreo de suelo, sin agregar otros tipos de evaluaciones.

Para la parte relativa al cálculo de las emisiones/stock de carbono, RACSA puede ser complementada con la herramienta ALU, que permite una personalización conveniente a CUSAF y al uso de factores de emisión específicos. Se descarta por el momento FLINT por no ser posible acceder a información detallada para evaluar la operatividad de la herramienta. Aun así, se considera una oportunidad que merece ulterior análisis y de posible interés por el país a nivel de sector UTCUTS.

2. Lista de herramientas

Los materiales necesarios para completar el trabajo de levantamiento y análisis de los datos de carbono son múltiples. Entre ellos algunos se aplican solo a una etapa concreta.

De aplicación general:

- Brújula
- GPS
- *Walkie-talkies*
- Tabletas
- Baterías externas para tabletas
- Fundas contra la lluvia para tabletas
- Baterías de reemplazo para pesas, láser y cualquier otro instrumento que la necesite
- Cargador externo de batería
- Cuchillo
- Plumón
- Cuaderno
- Cascos de seguridad
- Chalecos
- Tarjetas identificativas enmicadas
- Extensión eléctrica
- Plásticos para apoyar el material en el suelo y cubrirlo en caso de lluvia

Establecimiento de unidades muestrales:

- Láser para medir distancias
- Cinta métrica (100 m, 50 m)
- Cinta de plástico de 40 m y 5 m para delimitar las unidades muestrales
- Clinómetro para establecer pendiente y ajustar las medidas
- Palos

Biomasa aérea arbórea y arbustiva:

- Palos de 1.3 m de largo para medir la altura del tallo para DAP
- Cinta diamétrica
- Forcípula
- Instrumento de medición de altura (clinómetro, hipsómetro)

Sotobosque:

- Forcípula
- Cuadrantes de 0.5 x 0.5 m
- Cuchillo o tijeras
- Plumones
- Bolsas plásticas Ziplock
- Bolsas de papel
- Balanzas de 10 kg y 0.1 g de precisión para muestras y submuestras, respectivamente

Suelo:

- Machete, lampa o pala
- Cuchillo
- Plumones
- Bolsas plásticas Ziplock
- Etiquetas
- 3 baldes de 5 litros, o 3 bolsas grandes
- Cuadrante de aluminio de 1 x 1 m
- Pala o lampa

- Balanzas de 10 kg con precisión de 10 g para muestras
- Balanza con precisión de 0.1 g para submuestras
- Anillo muestreador de volumen conocido (se recomienda 5 cm de diámetro por 10 o 20 cm de longitud)

Colecta de especímenes:

- Periódicos (para especímenes)
- Tijeras telescópicas
- Cámara fotográfica
- Llaves de identificación
- Alcohol para conservación de especímenes
- Bolsas de plástico grueso para transporte de especímenes

3. Buenas prácticas y protocolos para el levantamiento de la información

En ese apartado se reúnen buenas prácticas y consejos para facilitar el trabajo de levantamiento de datos y asegurar su calidad.

Orientación de la unidad muestral durante su establecimiento

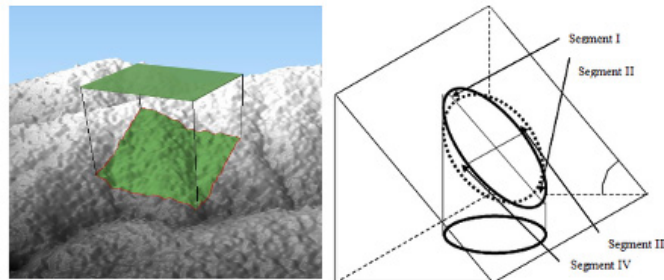
Durante del establecimiento de la unidad muestral asegurarse que desde el primer punto se siga en dirección norte para el lado más largo y hacia el este por el lado más corto. Si la unidad productiva no permite ese establecimiento, se hará según la orientación más apropiada teniendo en cuenta extensión y forma de la unidad productiva. Los vértices de UM1 y UM2 deben ser registrados (P1, P2, P3, P4) y se recomienda registrarlos en sentido horario.

Corrección de pendiente

Cuando se establece una unidad muestral y el terreno es inclinado, la superficie se ve distorsionada porque la distancia entre dos puntos medida a lo largo de una pendiente, siempre es mayor que una distancia horizontal equivalente (FAO, 2004).

No corregir las dimensiones de la unidad muestral puede llegar a tener un impacto significativo en la representatividad y precisión de los datos recopilados generando errores en los resultados.

El tamaño de la unidad muestral siempre se refiere al plano horizontal. Una unidad muestral con lado de 50 m en una pendiente deberá ser más larga para que su proyección horizontal coincida con la media esperada y el factor a multiplicar esa distancia inicial se puede calcular como la inicial dividida por el coseno de la pendiente expresada en grados.



Para resolver ese problema se debe aplicar la trigonometría que nos indica el factor de corrección que aplica a nuestro caso.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Establecer la pendiente de la unidad de muestreo con la ayuda de un clinómetro midiendo desde la parte baja de la unidad muestral hacia la parte más elevada.
2. Determinar la distancia deseada correspondiente al lado de la unidad muestral que corre perpendicular a la parcela haciendo uso de la tabla de corrección de pendientes (abajo).
3. Marcar el punto de medición y dirigirse al punto que se sitúa a la distancia determinada en el paso anterior.
4. Repetir la medición desde el punto encontrado en la parte alta de la unidad muestral.
5. Si el resultado obtenido coincide con la medición anterior se puede establecer la unidad muestral, si no se debe repetir el proceso.

Pendiente	Grados	Factor	Distancias horizontales										Pendiente	
			5	10	15	20	25	30	40	50	125	245		
%	o	fs												%
15	9	1,0112	5.1	10.1	15.2	20.2	25.3	30.3	40.4	50.6	126.4	247.7	15	
20	11	1,0198	5.1	10.2	15.3	20.4	25.5	30.6	40.8	51.0	127.5	249.9	20	
25	14	1,0308	5.2	10.3	15.5	20.6	25.8	30.9	41.2	51.5	128.8	252.5	25	
30	17	1,0440	5.2	10.4	15.7	20.9	26.1	31.3	41.8	52.2	130.5	255.8	30	
35	19	1,0595	5.3	10.6	15.9	21.2	26.5	31.8	42.4	53.0	132.4	259.6	35	
40	22	1,0770	5.4	10.8	16.2	21.5	26.9	32.3	43.1	53.9	134.6	263.9	40	
45	24	1,0966	5.5	11.0	16.4	21.9	27.4	32.9	43.9	54.8	137.1	268.7	45	
50	27	1,1180	5.6	11.2	16.8	22.4	28.0	33.5	44.7	55.9	139.8	273.9	50	
60	31	1,1662	5.8	11.7	17.5	23.3	29.2	35.0	46.6	58.3	145.8	285.7	60	
70	35	1,2207	6.1	12.2	18.3	24.4	30.5	36.6	48.8	61.0	152.6	299.1	70	
80	39	1,2806	6.4	12.8	19.2	25.6	32.0	38.4	51.2	64.0	160.1	313.8	80	
90	42	1,3454	6.7	13.5	20.2	26.9	33.6	40.4	53.8	67.3	168.2	329.6	90	
100	45	1,4142	7.1	14.1	21.2	28.3	35.4	42.4	56.6	70.7	176.8	346.5	100	
110	48	1,4866	7.4	14.9	22.3	29.7	37.2	44.6	59.5	74.3	185.8	364.2	110	
120	50	1,5620	7.8	15.6	23.4	31.2	39.1	46.9	62.5	78.1	195.3	382.7	120	
130	52	1,6401	8.2	16.4	24.6	32.8	41.0	49.2	65.6	82.0	205.0	401.8	130	
140	54	1,7205	8.6	17.2	25.8	34.4	43.0	51.6	68.8	86.0	215.1	421.5	140	
150	56	1,8028	9.0	18.0	27.0	36.1	45.1	54.1	72.1	90.1	225.3	441.7	150	

Medición de diámetros

La medición de diámetros se hace más comúnmente:

- Usando cintas diamétricas o forcípula en caso de árboles pequeños (inferiores a 10 cm).
- A 130 cm del suelo, que nos brinda el diámetro a la altura del pecho o DAP. En caso contrario se deberá anotar la altura de medición.

Anotaciones:

- Nada debe estar entre el aparato de medición y el tronco a medir. En el caso existan lianas, musgos u otra vegetación, deben removerlas.
- Los aparatos de medición deben mantenerse rectos de manera que su posición corte perpendicularmente el eje del árbol, evitando que se doble.
- Prestar atención a que la cinta diamétrica no esté torcida o doblada.

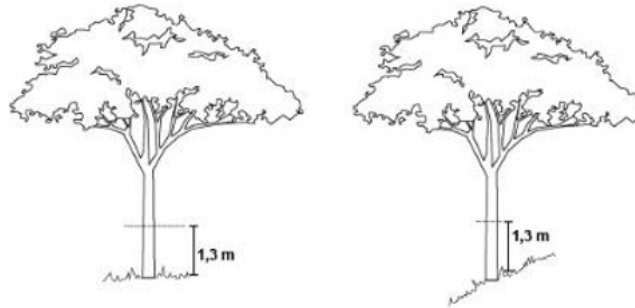


²⁷ Siguiendo las indicaciones de la FAO. 2004. Inventario forestal nacional. Manual de campo. Modelo. Programa de evaluación de los recursos forestales. Documento de trabajo 94/S. Guatemala.

Sugerencias:

- Para estar seguros de siempre medir a la misma altura, antes de empezar las mediciones recortar un palo a la altura de 1.30 m. Al momento de medir el diámetro, colocar el palo a la base (cuesta arriba) del árbol y efectuar la medida.
- Algunas cintas diamétricas suelen tener una punta afilada en su extremidad para anclarse al tronco y poder recorrer sus alrededores en el caso que el diámetro sea grande y la persona que mide no pueda contar con apoyo externo.
- Cuando haya árboles de diámetros muy grandes, el levantamiento va a requerir dos personas para asegurarse que sea hecho correctamente.

Casos de mediciones de diámetros particulares:



Árbol inclinado

Si el árbol no es recto, la medición se hará paralela al terreno y desde el lado del tronco más cercano al terreno. Con esa regla se evitan confusiones cuando hay árboles inclinados en una unidad muestral en pendiente.

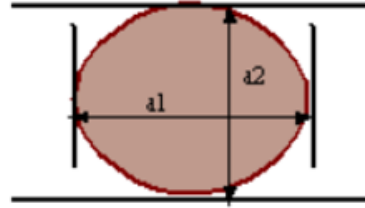


Árbol caído

La medición debe de hacerse a 1.3 m desde el punto de transición entre tronco y raíz.

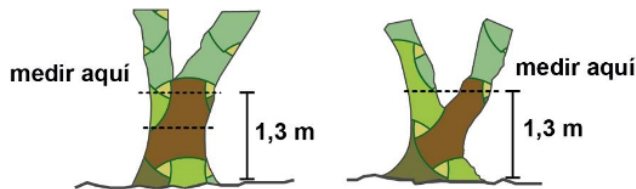
Árbol con tronco atípico. Aquí podemos encontrar varios casos:

Diámetros no circulares, se mide con la forcípula dos diámetros perpendiculares que representen los valores más próximos al menor y mayor a esa altura. Calcular y registrar la media de esos diámetros.



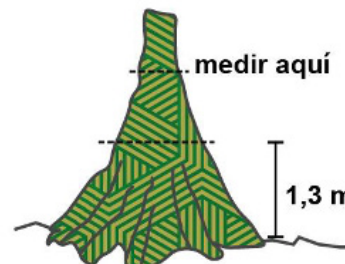
Árbol horquillado, lo que determina cómo medir es la altura de la horquilla.

- Por debajo de 1.30 m, se levanta cada tronco como árbol separado, si el diámetro corresponde a la clase diametral de la unidad muestral.
- La separación comienza a 1.30 m o un poco más arriba, entonces el árbol vale como uno solo. El diámetro se mide justo por debajo del punto de separación, haciendo atención a evitar la eventual protuberancia que podría existir.

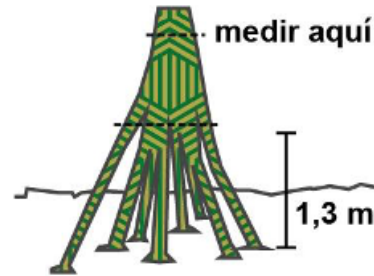


Con rebrotes de árboles muertos o cortados: se aplica el mismo criterio que con los árboles horquillados. Si los rebrotes son originados por debajo de los 30 cm del tronco, se mide su DAP a 1.30 m; si son originados entre 30 cm y 1.30 m, el diámetro se mide a 1 m del punto de origen.

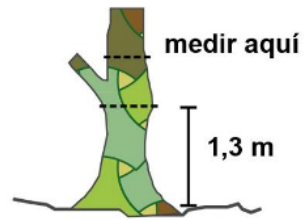
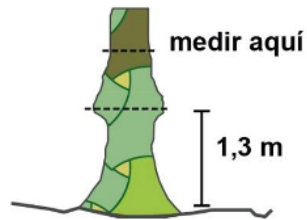
Árbol con base ensanchada o con contrafuertes: cuando el contrafuerte llega más arriba de los 90 cm de altura del terreno, se mide el diámetro 30 cm encima del ensanche o anchura principal de los contrafuertes.



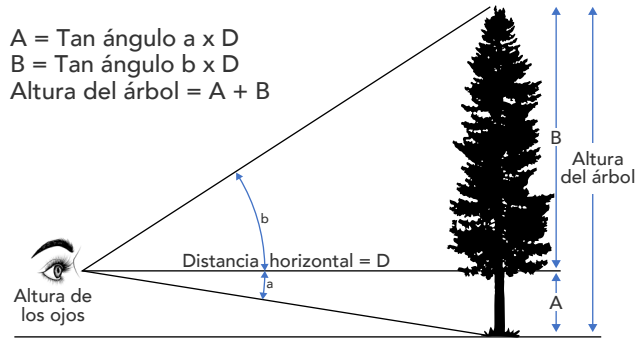
Árboles con raíces aéreas: el diámetro se mide a 1.3 m a partir del límite entre raíces y tronco.



Árboles con tronco irregular a 1.3 m del terreno: por ejemplo, en casos debidos a heridas, protuberancias y ramas, el diámetro se mide justo por encima del punto irregular.



De manera genérica, la medición de la altura se realiza con estos pasos:



1. Distancia del árbol (a 15, 20, 30 o 40 metros). Para evitar los errores de medición, la distancia desde el árbol debe ser equivalente a su altura.
2. Observación y registro del ángulo obtenido mirando al punto más alto de la copa.
3. Observación y registro del ángulo obtenido mirando a la base del árbol.

El cálculo de la altura se hace en gabinete y por eso no se procede con la adición o sustracción de los dos resultados de observación, según el caso, ni con la corrección por la pendiente.

Veamos cómo funcionan los tres instrumentos de medición más comunes.

Medición con el clinómetro y con el hipsómetro SUUNTO

El hipsómetro cuenta con un plato graduado que gira libremente sobre un eje. En uno de los lados del hipsómetro hay una ventana circular desde la que se pueden observar dos escalas de unidades (una en grados y otra en por ciento de tangente) y una línea horizontal. El clinómetro no brinda resultados de altura en forma directa, así que un cálculo en gabinete resulta necesario. El hipsómetro por el contrario indica directamente el valor de las alturas siempre que se aplique el instrumento a distancias prefijadas de 15 y 20 m.

Para la medición se coloca el instrumento delante del ojo derecho con la mano izquierda. Con el ojo derecho se observa la escala interna y con el izquierdo se observa el punto de interés. La visión simultánea llevará a la superposición de las dos visiones. La lectura se hace en el punto en el cual la línea intercepta la escala.

Medición con el hipsómetro Blume-Leiss y de Haga

Este instrumento cuenta con cuatro escalas correspondientes a cuatro distancias de medición del árbol prefijadas. Una vez escogida la distancia con la cual trabajar, el operador se ubica a esa distancia de la base del árbol y libera el péndulo/aguja del instrumento apuntando con él hacia el punto de interés. Una vez apuntado el observador levanta el dedo del botón que libera la aguja para bloquearla y hacer la lectura en la escala usada.

Si no ha podido encontrar una posición a una de estas distancias:

- Si la distancia horizontal es una fracción simple de una de las de la escala (por ejemplo, 10 m es la mitad de 20 m), lea desde la de la escala y multiplique por la fracción apropiada. Lea en la escala porcentual y multiplique este porcentaje por la distancia horizontal medida al comienzo.

Apunte a la base del árbol y efectúe una nueva medición liberando el péndulo/aguja del instrumento y apuntando con él hacia el punto de interés. Combine las alturas para determinar la altura total del árbol (ver abajo).

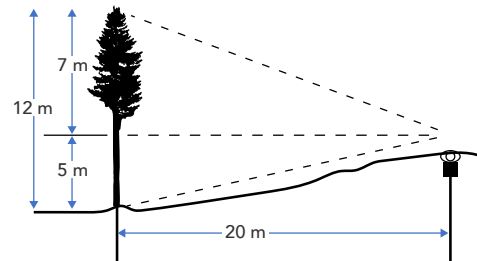
Medición con el hipsómetro láser NIKON FOREST PRO

La medición con ese hipsómetro es de las más fáciles pues el instrumento nos indica directamente la altura sin necesidad de ulteriores cálculos. Se apunta primero a la base del árbol, presionando el botón para el registro de la medida y se apunta hacia el punto de interés según la altura buscada presionando nuevamente para el registro del segundo dato. Estamos ahora listos para leer el resultado en el visor del instrumento.

Casos especiales de medición de alturas

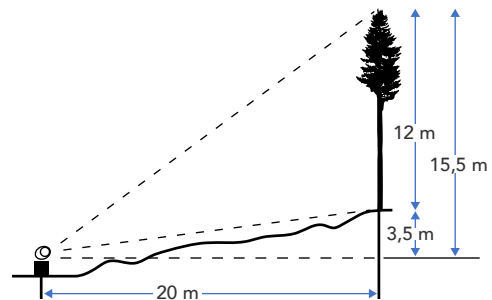
El observador se encuentra más arriba de la base del árbol

Se añaden los resultados de las dos mediciones (base y punto más alto de la copa) por encima y por debajo de la medición horizontal. En ese ejemplo: $7 + 5 = 12$.



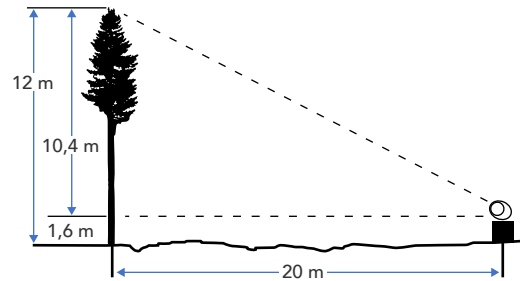
El observador se encuentra por debajo de la base del árbol

Se sustrae del total de los resultados de las dos mediciones (base y punto más alto de la copa) la distancia entre la base del árbol y la línea horizontal. En ese ejemplo: $15.5 - 3.5 = 12$.



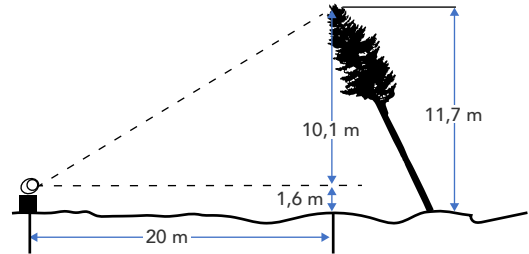
El punto de observación se encuentra a nivel del terreno y en ausencia de pendiente

Se añaden los resultados de las dos mediciones (base y punto más alto de la copa) a la altura del instrumento sobre el suelo. En ese ejemplo: $10.4 + 1.6 = 12$.



El árbol está inclinado hacia el observador en ausencia de pendiente

Se añade la altura del instrumento desde el terreno a la distancia medida desde la copa del árbol hasta un punto situado justo por debajo, en la horizontal (utilización de una barra telescópica). En ese ejemplo: $10.1 + 1.6 = 11.7$.



4. Factores de conversión de unidad muestral a hectárea

Uso de la tierra	Tipo	Dimensiones (m)	Superficie (m ²)	UM (unidades)	Superficie total (m ²)	Factor
Genérico	UM2	5 x 40	200	2	400	25
		20 x 25	500	2	1000	10
		20 x 50	1,000	2	2000	5
Pastizales		20 x 25	500	4	2000	5
		100 x 100	10 000	1	10 000	1
		100 x 100	10 000	2	20 000	0.5
Cacao / café	Sub UM2	20 x 10	200	2	400	25
Todos	UM1	100 x 20	2000	1	2000	5

5. Ecuaciones alométricas de algunas especies

Ecuaciones alométricas genéricas

Ecuación/factor	Resultado	Alcance	Fuente
$0,112 \times (\rho * DAP^2 * ht)^{0,916}$	AGB	Costa y sierra	Chave et al. (2005)
$\rho * \text{Exp} (-1,239 + 1,980 * \ln(DAP) + 0,207 * \ln(DAP)^2 - 0,0281 * \ln(DAP)^3)$	AGB	Selva alta y Zona de humedales	Chave et al. (2005)
$\rho * \text{Exp} (-1,499 + 2,148 * \ln(DAP) + 0,207 * \ln(DAP)^2 - 0,0281 * \ln(DAP)^3)$	AGB	Selva baja	Chave et al. (2005)
$0.0673 * (\rho * D^2 * H)^{0.976}$	AGB	Pantropical	Chave et al. (2014)
$\rho / 0.67 * \exp(0.33 * \ln(D) + 0.093 * \ln(D)^2 - 0.122 * \ln(D)^3) - 0.37$	AGB	Bosque lluvioso tropical, con suelo arcillo (Amazonía)	Baker, et al (2004)
$\ln(AGdry\ mass) = -2.025 + 2.459 \ln(D)$	AGB	Bosque lluvioso tropical (Noroeste amazónico)	Lima et al, 2012
$6,666 + 12,826 * ht^{0,5} * \ln(ht)$	AGB	Palmas de alto porte (ht > 11m)	Pearson et al. (2005)
$23,487 + 41,851 * \ln(ht)^2$	AGB	Palmas de bajo porte (ht ≤ 11m)	Pearson et al. (2005)

Donde: ρ = densidad de la madera; DAP = diámetro a la altura de pecho; ht = altura del árbol

Ecuaciones alométricas específicas de especies encontradas en San Martín y Amazonas

Familia	Género	Especie	Resultado	Unidad	Ecuación alométrica	Fuente
Arecaceae	Bactris	gasipaes	AGB	kg	$0.1196 * H^{1.9249}$	
Melastomataceae	Bellucia	pentamera	AGB	kg	$-1.8158 + 2.37 * \ln(DAP)$	
Rubiaceae	Calycophyllum	spruceanum	AGB	kg	$0.072 * DAP^{2.642}$	
Urticaceae	Cecropia	sciadophylla	log AGB	kg	$-2.5118 + 2.4257 * \ln(DAP)$	
Meliaceae	Cedrela	odorata	AGB	kg	$21.3 - 6.95 * DAP + (0.74 * DAP^2)$	
Fabaceae	Cedrelinga	cateniformis	log AGB	kg	$-2.96 + 2.66 * \ln(DAP)$	
Clusiaceae	Clusia	hilariana	AGB	kg	$9219.26 * DAP^{2.48}$	
Rubiaceae	Coffea	arabica	AGB	kg	$= 0.281 * DAP^{2.06}$	Arifin, 2001

Familia	Género	Especie	Resultado	Unidad	Ecuación alométrica	Fuente
			log AGB	kg	$-2.7308+1.6826*\ln(-DAP)+0.8732*\ln(H)$	
Boraginaceae	Cordia	alliodora	log AGB	kg	$-0.755+2.072*\ln(DAP)$	
Sapotaceae	Chrysophyllum	sp	AGB	kg	$0.182+0.498*Y+0.049*(H)^2$	
Euphorbiaceae	Croton	matourensis	log AGB	kg	$-3.74+2.07*\ln(DAP)+0.97*\ln(Ht)$	
Arecaceae	Euterpe	precatória	AGB	kg	$6.666+1.826*(Ht^{0.5})*LN(Ht)$	
Malvaceae	Guazuma	crinita	AGB	kg	$0.048* DAP ^2.78$	
Fabaceae	Inga	sp	log AGB	kg	$-2.2617+1.6395*\ln(-DAP)+0.8097*\ln(Ht)$	
Arecaceae	Iriartea	deltóidea	log AGB	kg	$-3.483+0.94371*\log(Hc*-DAP^2)$	
Arecaceae	Mauritia	flexuosa	log AGB	kg	$2.4647+1.3777*\log(Ht)$	
Anacardiaceae	Mangifera	Indica	Ln AGB	kg	$-2.6554+2.2630*\ln(H)$	
Melastomataceae	Miconia		AGB	kg	$54508*(DAP^2)-61433*X+22861$	
Musaceae	Musa	paradisiaca	AGB	kg	0.030 DAP ^{2.13}	Arifin, 2001
			AGB	kg	0.0001(circumference1.30) ³ + 35.62	Ortiz-Ulloa et al 2019
			AGB	kg	0.0203DBH ² + 0.0927	Alcudia-Aguilar et al. 2019)
			log AGB	kg	$-2.891 + 2.385 \times \ln(DBH) + 1.008 \times \ln(H)$	
Pinaceae	Pinus	patula	AGB	kg	$\exp(-4.7483+1.7395*\ln(DAP*H))$	
Piperaceae	Piper	obliquum	AGB	kg	$0.3627+0.0322*(DAP^2)*H$	
Sapotaceae	Pouteria	caimito	AGB	kg	$0.71*H^{1.78}$	
Fabaceae	Schizolobium	parahyba	AGB	kg	$0.1511* DAP ^1.5862$	
Arecaceae	Socratea	exorrhiza	log AGB	kg	$-3.7965+1.0029*\log(Hc*-DAP^2)$	
Meliaceae	Swietenia	macrophylla	AGB	kg	$21.3-6.95* DAP + 0.74*DAP^2$	
Malvaceae	Theobroma	bicolor	AGB	kg	$0.44*H^{1.59}$	
Malvaceae	Theobroma	cacao	AGB	kg	$0.4849*D30^{1.42}$	
			AGB	kg	0.1208*DAP ^{1.98}	Yuliasmara, 2008



 **AgroFor**

