



PROGRAMA DE CONVERSIÓN DE DEUDA
DEL SECTOR FORESTAL A ENERGÍA



Ingeniería en
**Energías
Renovables**

MANEJO TECNOLÓGICO DEL SUELO

PARA LA SUSTENTABILIDAD
DE LAS PLANTACIONES
DENDROENERGÉTICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE CIENCIAS
FORESTALES



BCIE

**MANEJO TECNOLÓGICO DEL SUELO PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LAS
PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS**

AUTOR:

EDWIN ESQUIVEL

RECONOCIMIENTO TÉCNICO:

**CÉSAR AUGUSTO ALVARADO
SANDRA ELIZABETH CERRATO**

DICIEMBRE 2017

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	5
ESTUDIO DETALLADO DEL SUELO (PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, BIOLÓGICAS).....	7
BIBLIOGRAFÍA DE APOYO.....	35
MUESTREO A NIVEL DE CAMPO Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	43
PROTOCOLOS PARA LA INVESTIGACIÓN EN RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA.....	45
TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE USO DE LOS EQUIPOS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN.....	53
PREPARACIÓN DEL SUELO Y TÉCNICAS DE MECANIZACIÓN MANUAL.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	60
MONITOREO DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y EN LA BIOMASA Y MANUAL SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ESPECIES DENDROENERGÉTICA.....	61
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA PARA LEER.....	69
TESIS RECOMENDADAS.....	75
VIDEOS.....	75

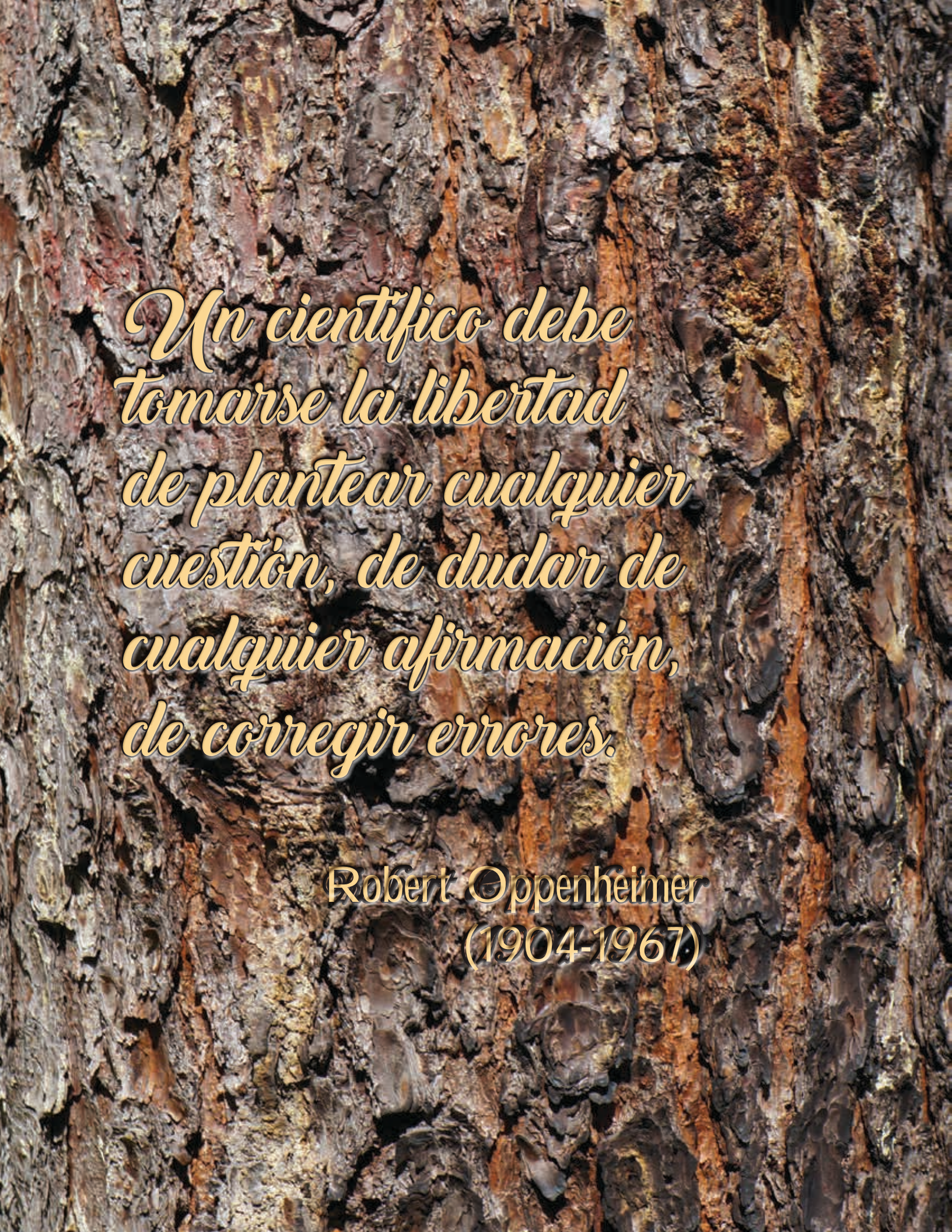
INTRODUCCIÓN

Rotaciones cortas y altas densidades de siembra, aunado a una adecuada selección de las especies y el entendimiento de los factores del suelo, caracterizan los sistemas dendroenergéticos sostenibles. Las especies forestales para aplicaciones en dendroenergía, idealmente deben maximizar características que permitan buenas relaciones de sustentabilidad del sistema. Por lo tanto, se debe contemplar el uso de especies que representen mejor eficiencia en la utilización de agua y nutrientes, buen rendimiento de materia seca por unidad de área al año, se debe contemplar la capacidad de la especie para acortar los ciclos de rotación y menores requerimientos de fertilización. Tales requerimientos deben permitir a las especies crecer bien sobre suelos de baja calidad que normalmente no son utilizados en las actividades agrícolas y forestales tradicionales. Los sistemas dendroenergéticos promueven una capa de materia orgánica por lo que se debe minimizar disturbios en el suelo. Este entendimiento busca minimizar la exportación de nutrientes en la biomasa, la selección de especies arbóreas con demandas nutritivas bajas y las capacidades de reponer bioelementos nutritivos extraídos. Esta es la razón porque desde el punto de vista de la sustentabilidad no deben utilizarse las hojas como biomasa para la producción de energía. Un cultivo dendroenergético sustentable buscará, desde la perspectiva del suelo, la aplicación de enmiendas para correcciones de pH, basadas en un análisis previo, aplicación de elementos nutricionales deficientes, un control de arvenses adecuado y finalmente la reposición de los nutrientes extraídos en cada una de las cosechas.

Este módulo abordará las técnicas de estudio de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como factor para la producción de biomasa, considerando los requerimientos de las especies propias de los ambientes más favorables para una producción sostenible. Se introducirán los métodos más utilizados y validados para el estudio de suelos y el uso de equipos de laboratorio. Se detallarán las principales labores de manejo y corrección de los factores limitantes del suelo para el crecimiento de las especies, que incluye los estudios que se deben realizar para el análisis e interpretación nutricional del suelo y en los componentes de la biomasa.

OBJETIVO GENERAL

Introducir al estudiante al estudio y comprensión de las propiedades del suelo y su rol en la productividad de sistemas de producción de biomasa en ciclos cortos y repetidos en el tiempo. Incluye el repaso de las técnicas de análisis de laboratorio y uso de equipos de laboratorio. Comprensión del balance que debe existir entre la reserva de nutrientes en el suelo y las capacidades de extracción de nutrientes en los fustes y corteza de las especies seleccionados en un proyecto dendroenergético.



*Un científico debe
tomarse la libertad
de plantear cualquier
cuestión, de dudar de
cualquier afirmación,
de corregir errores.*

*Robert Oppenheimer
(1904-1967)*

ESTUDIO DETALLADO DEL SUELO (PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS, BIOLÓGICAS)

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

Esta unidad facilita la comprensión de las propiedades del suelo atendiendo las propiedades físicas, las propiedades químicas y la relación biológica. El suelo constituye uno de los factores más importantes en el manejo y el rendimiento de las plantaciones forestales. Su comprensión es determinante para el éxito de los modelos de plantaciones de alta densidad por su impacto en la extracción de nutrientes y la sostenibilidad de producción de biomasa a través de varios ciclos de cosecha. El suelo constituye uno de los factores que pueden ser acondicionados desde el inicio de la plantación y también constituye un importante reservorio de carbono. Un adecuado manejo de la relación especie-suelo permite a través del tiempo la recuperación de las áreas degradadas. El objetivo es que el estudiante reflexione sobre posibles consecuencias para la sostenibilidad del suelo del uso intensivo del sitio para la producción de biomasa forestal para energía. La unidad será desarrollada con la ayuda de un manual detallado.

DESARROLLO DE CONTENIDO

La evaluación de la sustentabilidad de las actividades humanas es en la actualidad uno de los objetivos primordiales para el éxito de las actividades productivas, más aún cuando se están utilizando recursos naturales para generar riqueza, ya sea esta para una empresa o para una nación. Entre los aspectos más importantes a considerar en el éxito de las unidades productivas están todas las consideraciones que se puedan tener con respecto al manejo del suelo, incluyendo los controles de maleza, el manejo de los nutrientes y la dinámica del agua. Siendo lo más importante en todo su conjunto mantener la sustentabilidad del sistema productivo.

Para el desarrollo de las plantaciones dendroenergéticas debemos comprender las principales propiedades del suelos, su significado y su rol dentro del manejo del cultivo dendroenergético.

Estas plantaciones han demostrado grandes aportes a la captura de carbono, y es sabido que se debe tener cuidado con las extracciones de nutrientes, a su vez de debe tener control de la eficiencia nutricional del cultivo que es influenciado por el sitio, en el que se muestran efectos positivos mediante la fertilización y la adición de materia orgánica.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

COLOR DEL SUELO

El color del suelo es una propiedad física relacionada con la longitud de onda del espectro visible que el suelo refleja al recibir los rayos de luz. El tono y la intensidad de los colores del suelo superficial y de sus horizontes permiten hacer inferencias sobre sus características y procesos pedogenéticos. El color del suelo está determinado principalmente por la cantidad y estado de los minerales de hierro y/o manganeso, calcio así como de la materia orgánica, además de la existencia de procesos de oxidación o reducción. El color del suelo afecta, indirectamente, la temperatura y la humedad, a través de su efecto sobre la energía radiante. Un suelo de color oscuro, bajo la misma cantidad de energía radiante, se secará más rápidamente que uno de color claro, debido a que el suelo oscuro absorberá mayor cantidad de energía radiante y por tanto; tendrá mayor cantidad de energía calorífica disponible para un mayor grado de evaporación. Una cubierta vegetal o de residuos de cultivo, reducirá estos efectos.

Interpretar el color que presenta el suelo es de importancia por sus relaciones con:

- a. clima
- b. contenido de materia orgánica
- c. drenaje interno y estado de aireación del suelo.

Lo anterior significa que una descripción previa del suelo en su constitución de horizontes brinda orientaciones al silvicultor sobre aspectos físicos, químicos y biológicos que forman parte de los criterios de selección de sitios para reforestación con especies dendroenergéticas.

¿Cómo evaluamos el color del suelo?

La Tabla Munsell sirve de guía para la medición y notación de los colores. La guía de colores presenta divisiones de los tres atributos del color en el sistema Munsell conocidos como Hue (Matiz), Value (Claridad) y Chroma (Pureza).

1. **Hue (Matiz):** corresponde al matiz o tinte (hue), el cual indica la relación del color con el rojo, amarillo, verde, azul o púrpura, y se asigna una carta para cada matiz
2. **Value (Claridad):** el cual indica la luminosidad (claridad) u oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro. Se refiere al brillo e indica la claridad del color que se presenta en sentido vertical varía desde oscuro en la parte inferior de la carta hasta más claro en la parte superior incrementando su valor (haciéndose más claro) de abajo hacia arriba.

- 3. Chroma (Pureza):** indica su intensidad. Expresa la intensidad o saturación (chroma), indica la fuerza del color o su desviación del gris, con una misma claridad y se presentan en sentido horizontal, en la parte inferior de la hoja, incrementándose de izquierda a derecha.

Factores que influyen al observar el color:

1. La calidad e intensidad de la luz afecta la cantidad y calidad de la luz reflejada de la muestra hacia el ojo. Se recomienda tomar el color a campo abierto con incidencia directa de la luz natural sobre la hoja de la tabla Munsell, utilizando preferiblemente las horas del mediodía; cuando esto no es posible, se sugiere tomar muestras para determinar posteriormente el color.
2. Rugosidad de la superficie reflectora, que afecta la cantidad de luz reflejada hacia el ojo, en especial si la luz incidente cae en un ángulo agudo. Se recomienda usar, en lo posible, un ángulo recto para la luz incidente.
3. Humedad de la muestra, el color fluctúa dependiendo del contenido de humedad; por ello se acostumbra tomar el color bajo dos condiciones: suelo seco (seco al aire) y suelo húmedo. La condición de suelo seco o suelo húmedo se establece sobre la base que, en ambos casos, el nivel óptimo se alcanza cuando al humedecer o secar la muestra no ocurren más cambios que en el color.

Medición del color:

Se realiza mediante la comparación de la muestra con las plaquitas de colores que componen cada una de las hojas de Matiz (Hue). Se evalúa el color predominante (color de la matriz del suelo), que se corresponde con el que ocupa más de 50% del volumen del suelo. Cuando existen varios colores, donde ninguno de ellos corresponde a más de 50% del volumen, se determinan todos los colores, comenzando con el que ocupa el mayor porcentaje.

INTERPRETACIÓN DEL COLOR DEL SUELO

Color negro: se asocia a la incorporación de materia orgánica que se descompone en humus que da la coloración negro al suelo principalmente las huminas. Como tal, este color ha sido asociado con niveles altos de materia orgánica en el suelo, condiciones de buena fertilidad, en especial presencia de cationes tales como el Ca^{2+} y Mg^{2+} y K^+ ; colateralmente tiene asociado otras condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica; en otras oportunidades, cuando hay acumulación de Na^+ , por ser este un agente dispersante, el suelo, aún con muy bajos niveles de materia orgánica, adquiere la coloración negra, pero tiene como condición asociada a una muy mala condición estructural. Orgánica altamente descompuesta.

Como tal, este color ha sido asociado con niveles altos de materia orgánica en el suelo, condiciones de buena fertilidad, en especial presencia de cationes tales como el Ca^{2+} y Mg^{2+} y K^+ ; colateralmente tiene asociado otras condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica; en otras oportunidades, cuando hay acumulación de Na^+ , por ser este un agente dispersante, el suelo, aún con muy bajos niveles de materia orgánica, adquiere la coloración negra, pero tiene como condición asociada a una muy mala condición estructural. En resumen, este color color por lo general está asociado a la presencia de:

- Carbonatos de Ca^{2+} o Carbonatos de Mg^{2+}
- Otros cationes (Na^+ , K^+) más materia orgánica altamente descompuesta.

Color rojo: se asocia a procesos de alteración de los materiales parentales bajo condiciones de alta temperatura, baja actividad del agua, rápida incorporación de materia orgánica, alta liberación de Fe de las rocas; es indicativo de condiciones de alta meteorización, se asocia a niveles bajos de fertilidad del suelo, pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación. En términos generales se asocia con la presencia de:

Óxidos de Fe^{3+} como es el caso de la hematita (el oligisto o hematita es un mineral compuesto de óxido férrico, cuya fórmula es Fe_2O_3).

Color amarillo a marrón amarillento claro:

por lo general es indicativo de meteorización bajo ambientes aeróbicos (oxidación), ocurre como en el caso de la goethita (es un oxihidróxido de hierro (III), de fórmula $\alpha-FeO(OH)$, con un contenido del 63% en hierro, y donde puede encontrarse hasta un 5% de manganeso. La feroxihita y la lepidocrita son polimorfos de este mineral, pues tienen igual composición y fórmula y diferente sistema de cristalización.), donde cristales grandes de este mineral confieren una pigmentación amarilla al suelo, mientras que cristales pequeños de este mineral confieren tonalidades de color marrón; más frecuentemente estos colores asociados a la goethita ocurren en climas templados. Se relaciona con condiciones de media a baja fertilidad del suelo. En general se asocia con la presencia de:

Óxidos hidratados de Fe^{3+}

Color marrón:

este color está muy asociado a estados iniciales a intermedios de alteración del suelo (suelos jóvenes); se relaciona con condiciones de niveles medios a bajos de materia orgánica y un rango muy variable de fertilidad. En general se asocia con la ocurrencia de:

- materia orgánica ácida parcialmente descompuesta.
- combinaciones de óxidos de Fe más materiales orgánicos.

Color blanco: se debe fundamentalmente a la acumulación de ciertos minerales o elementos que tienen coloración blanca, como es el caso de calcita ($CaCO_3$) de color blanco, fosforito, amarillo, rojo, naranja, azul, verde, castaño, gris y otros) a veces se usa como sinónimo caliza, aunque es incorrecto pues ésta es una roca más que un mineral, su nombre viene del latín calx, que significa cal viva, es el mineral más estable que existe de carbonato de calcio), dolomita (es un importante mineral de rocas sedimentarias y metamórficas, encontrado como mineral principal de las rocas llamadas dolomías y metadolomías, es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [$CaMg(CO_3)_2$]). En general se asocia con la presencia de:

- Óxidos de Al y silicatos
- Sílice (SiO_2)
- Suelos alcalinos ($CaCO_3$, $MgCO_3$)
- Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)
- Sales altamente solubles

Color gris: puede ser indicativo del ambiente anaeróbico. Este ambiente ocurre cuando el suelo se satura con agua, siendo desplazado o agotado el oxígeno del espacio poroso del suelo. Bajo estas condiciones las bacterias anaeróbicas utilizan el hierro férrico (Fe^{3+}) presente en minerales como la goethita y la hematita como un aceptor de electrones en su metabolismo.

Color verde: en algunos suelos bajo condiciones de mal drenaje se genera este color. Estos suelos están constituidos por materiales altamente calcáreos que se ubican en el denominado pantano lacustrino (lacustre es todo lo que guarde relación con un lago por lo que está relacionado con materiales formados en o por los lagos como depósitos de playas lacustres), distribuido en forma concéntrica alrededor del lago. Estos materiales calcáreos, bajo un ambiente anaeróbico, generan el color verde que se transforma en blanco de forma irreversible una vez que se oxida. También se asocia con la ocurrencia de:

Óxidos Fe^{2+} (oxidados incompleto)

Color azulado: en zonas costeras, deltaicas o pantanosas donde hay presencia del anión sulfato, y existen condiciones de reducción (saturación con agua y agotamiento del oxígeno), este anión es utilizado por las bacterias anaeróbicas como aceptor de electrones, liberándose S_2 , que se combina con Fe^{2+} para precipitar como FeS que es de color negro, con el tiempo se transforma en pirita (es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS_2 (bisulfuro de hierro (II), tiene un 53.48% de azufre y un 46.52% de hierro, la pirita es uno de los minerales más usados para la obtención del ácido sulfúrico (H_2SO_4) por su elevado porcentaje en azufre) que da un color azulado metálico. Adicionalmente, esta coloración se asocia con la presencia de:

- Óxidos hidratados de Al
- Fosfatos ferrosos hidratados

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL COLOR DEL SUELO

Materiales:

- Muestras de suelo
- Tabla Munsell de suelos
- Espátulas
- Platos petri o cápsulas de porcelana
- Procedimiento

Tome diferentes muestras de suelo húmedas, colóquelas directamente debajo de la apertura que separa las muestras de color. Seleccione previamente por comparación ocular la página donde mejor calza la muestra. Vea la muestra en un ángulo de 90° permitiendo que la luz incida a 45° sobre la muestra y la tabla. Anote correctamente los colores en la notación Munsell y compare con sus compañeros los valores obtenidos, trabaje en grupos para determinar mejor el color. Seque durante 24 horas en el horno a 110°C las mismas muestras de suelo a las que se les midió el color y vuelva a medir el color a las mismas muestras en seco. Compare los colores en seco y en húmedo e indique las diferencias. Si usted tiene problemas para distinguir los diferentes colores, indíquelo al instructor.

Preguntas:

1. ¿Cuáles son las ventajas de la notación Munsell del color comparado con las descripciones usadas anteriormente con nombres como: amarillo paja, amarillo limón, rojo encendido, etc. referido a suelos?
2. ¿Cuáles son los usos más importantes del sistema de notación Munsell en la selección de sitios para plantaciones dendroenergéticas?
3. ¿Por qué existe diferencia en los colores del suelo en húmedo con respecto a cuándo están secas?

TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo es la relación porcentual de las partículas minerales menores en tamaño a 2.0 mm que corresponden a las arenas, limos y arcillas, cuya distribución de dichas partículas minerales se realiza según su tamaño.

La importancia de su determinación reside en su uso para describir e identificar perfiles y en mapeo de suelos. También para pronosticar de manera general propiedades químicas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y propiedades físicas como retención de humedad del suelo, consistencia del suelo, velocidad de infiltración, erodabilidad del suelo entre otros.

La textura puede determinarse por varios métodos y entre los más conocidos se encuentra el tacto, por el método de la pipeta, el método del hidrómetro modificado por Day, el método del Comité sobre Análisis Físicos de la Sociedad de la Ciencia del Suelo de los Estados Unidos que adoptó un procedimiento semejante al de Day, ya que usó el cálculo de Casagrande, una concentración de suspensión máxima de 40 g/l y el hidrómetro tipo ASTM-152H; y por el método del hidrómetro de Bouyoucos. Este último método es un proceso de sedimentación de las partículas de arena, limo y arcilla a diferentes tiempos midiéndose durante el proceso la concentración de sólidos en suspensión con un densímetro ASTM 152H (gramos de sólidos en suspensión / litro de la mezcla en suspensión) (g/l).

El densímetro que se utiliza en el método de Bouyoucos fue graduado para indicar los gramos de sólidos suspendidos por litro de la mezcla a una temperatura dada (19.4°C) suponiendo que el medio de suspensión sea agua pura. La densidad de la fase líquida se afectará con las variaciones de temperatura y con la presencia de los agentes reactivos agrupados al suelo, para los cuales existen tablas de corrección por temperatura.

Se utiliza la ley de Stoke para calcular la velocidad de sedimentación de las partículas. Se pueden presentar algunos errores en las lecturas del hidrómetro. Por ejemplo, según la Ley de Stoke, la viscosidad del agua afecta la tasa de sedimentación y cambia aproximadamente en un 12% por cada 10 grados Celsius de temperatura. Otro error es cuando el hidrómetro está superficialmente sumergido, esto porque la concentración de la suspensión cambia con rapidez en las capas superficiales, lo cual se corrige tomando una cantidad de suelo que produzca una concentración inicial de 40 g/l, no más de ese valor.

La exactitud del método depende de la densidad de la partícula del suelo y del grado de control de la temperatura durante el experimento. Para que la relación de este método que se fundamenta en la Ley de Stokes, la cual establece que la velocidad de caída de las partículas pequeñas, en un medio líquido, es directamente proporcional a su tamaño; tenga validez, deben cumplirse algunas condiciones como:

- Total dispersión de las partículas del suelo durante todo el tiempo que dure el proceso de sedimentación, es decir, que no se presente floculación durante la determinación.
- Todo el proceso de sedimentación se lleve a cabo a temperatura constante.
- La concentración de la suspensión sea lo suficientemente diluida, de modo que no afecte significativamente la viscosidad.
- El recipiente en el cual se efectúa la sedimentación, tenga un diámetro lo suficientemente grande, como para evitar la atracción de sus bordes sobre las partículas.

Las condiciones anteriores llevaron, entonces, a calibrar un hidrómetro que permitiera estandarizar el método y establecer correcciones en aquellos casos en que se presentaran desviaciones en las condiciones experimentales ideales; estas condiciones de calibración se basan en varios supuestos:

- Las partículas del suelo son esféricas y presentan igual densidad.
- Las partículas se sedimentan en caída libre.
- No se presenta turbulencia en la suspensión.
- Todas las partículas que están sedimentando, tienen tamaños mayores al tamaño de las moléculas de agua.

Para definir el tipo de textura se relacionan los porcentajes de arenas, limos y arcillas obtenidos por algún método, por ejemplo el método de Bouyoucos y luego se utiliza el triángulo textural del USDA para estandarizar la determinación textural.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO

Con ayuda del manual correspondiente, se procederá a tomar muestras de suelo y realizar la determinación textural con ayuda de varios métodos sugeridos por el profesor

Preguntas:

1. ¿Por qué es importante conocer la textura del suelo?
2. ¿Qué papel juega la textura en la selección de sitios para plantaciones dendroenergéticas?
2. ¿Por qué se usa dispersante en el método de Bouyoucos?

3. ¿Qué ocurriría con los resultados si no se usa un agente dispersante?
4. ¿Por qué la materia orgánica afecta las lecturas del hidrómetro?
5. ¿Cómo afecta la temperatura (y por qué) la lectura del hidrómetro, si es mayor o menor de 19.4°C en el cilindro al hacer el experimento?

ESTRUCTURA DEL SUELO

En el suelo hay partículas de distintos tamaños, desde menores a 2 micras y hasta 2 mm, que no se observan por separado sino que aparecen más o menos agrupadas siguiendo diferentes procesos en los que predominan la simple adhesión o la floculación de los coloides, que lleva consigo el englobamiento de las partículas de mayor tamaño. En el caso de la adhesión suele presentarse una fragmentación subsecuente. Todo ello genera unas formas diferentes que reciben nombres específicos para facilitar la comprensión y simplificación de las descripciones

La estructura del suelo es una propiedad edáfica que diferencia un suelo de un material geológico. La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

La vida en el suelo es posible debido a que las partículas no forman una masa continua, sino que al unirse forman los agregados (agregación o floculación), crean espacios donde muchos de los cuales se comunican entre sí formando los poros, canales, fisuras y huecos. Por medio de los espacios comunicantes se presenta la transferencia de fluidos de agua y aire, teniendo en ellos el desarrollo de la actividad microbiana y el crecimiento radical.

La estructura del suelo se define como el resultado de la combinación de los componentes primarios arenas, limos y arcillas y otros más grandes de naturaleza mineral junto a componentes orgánicos, los que por acción directa de materiales cementantes, se agregan y se forman los agregados del suelo llamados peds. Por ello, los agregados o unidades estructurales del suelo se definen como el producto de las partículas que se unen de forma natural entre sí para formar unidades secundarias de mayor tamaño que tienen carácter persistente. Entre los materiales cementantes más importantes se encuentran los minerales arcillosos, la materia orgánica coloidal, los óxidos de hierro y aluminio, los carbonatos y otros.

En un estudio de estructura del suelo para su descripción se debe de considerar:

- i. Forma de los agregados o tipo de estructura
- ii. Tamaño de la estructura o clase de estructura
- iii. Grado de desarrollo de la estructura

FORMA DE LOS AGREGADOS O TIPO DE ESTRUCTURA:

El tipo de estructura o forma de los agregados se refiere a la forma y ordenamiento de las partículas primarias y se clasifican en:

- Migajosa
- Granular
- Angular o en bloques angulares
- Subangular o en bloques subangulares
- Prismática
- Columnar - prismas
- Laminar o capas horizontales
- Sin estructura (Horizontes de partículas sueltas, masivos, estructura fibrosa, estructura escamosa)

GRADO DE ESTRUCTURA

En el campo el grado de estructura se determina empíricamente, observando la durabilidad de los agregados y la proporción relativa del material agregado o desagregado que resulta cuando los peds son desplazados o removidos de la masa del suelo o cuando un fragmento de la masa del suelo se presiona suavemente entre los dedos. Por ello es necesario realizar la descripción del grado de estructura a un contenido de humedad como capacidad de campo.

El grado de estructura por sus características es primordial para la clasificación del suelo en:

1. grado 0 o sin estructura: son los suelos donde no se observa agregación (peds) o no se observa la presencia de líneas o planos naturales de debilitamiento. Si el suelo es denso se califica como masivo y si es material suelto se considera grano suelto.
2. grado 1 o débil: se aplica a materiales que se caracterizan por tener peds indefinidos y muy pobremente formados, observables con gran dificultad dentro de la masa del suelo. Cuando la masa del horizonte se disturba se obtiene una mezcla de unos pocos peds enteros, otros partidos y una gran cantidad desmenuzados o no agregados. Cuando se intenta separar los peds de la masa del horizonte estos suelen desmenuzarse con gran facilidad. En ocasiones el grado débil puede ser subdividido en muy débil o moderadamente débil.
3. grado 2, media o moderada: se caracteriza por la presencia de peds definidos y bien formados, moderadamente consistentes y evidentes, pero que se desmenuzan con relativa facilidad cuando se trata de retirarlos de la masa del suelo. Cuando el horizonte se disturba generalmente resulta una mezcla de bastantes peds enteros y definidos, pocos peds partidos y muy poco material disgregado.

4. grado 3 o fuerte: se aplica cuando los pedos son rígidos y bien formados y se adhieren débilmente entre sí. No solamente pueden ser separados con facilidad de la masa del suelo, sino que se requiere de una apreciable presión de los dedos para desmenuzarlos. El grado fuerte puede ser subdividido en moderadamente fuerte o muy fuerte.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO:

Instrucciones:

Se puede determinar varias estructuras de diferentes clases y tipos de suelo o de diferentes horizontes en un mismo perfil de suelo

Materiales:

- Muestras de suelo indisturbada de 10*10*10 cm como mínimo con humedad de capacidad de campo
 - Agua destilada
 - Espátula
 - Cuchilla
 - Tamiz de 2.0 mm
 - Contenedores y bandejas
 - Balanza granataria o analítica
 - Guía para la clasificación de pedos de acuerdo a su tamaño según su forma
 - Vidrio transparente de 30 * 30 cm
- Procedimiento:**
- Se toma la muestra de suelo indisturbada que se encuentre en condiciones de humedad ideal a capacidad de campo
 - Se desmenuza suavemente entre las manos ejerciendo movimientos semicirculares teniendo especial cuidado de no aplicarle fuerza directa, esto con el fin de obtener los pedos sin modificar su estructura original.
 - Con una brocha o pincel de cerdas suaves se retira el material suelto que rodea cada uno para obtener su tamaño real y apreciar su forma sin distorsiones.
 - Se deben de clasificar de acuerdo a su tamaño haciendo uso del manula correspondiente y la guía, según sea su forma y disponerlos para su cuantificación (medición de la abundancia) de acuerdo a las categorías de: 1- muy grueso, 2- grueso, 3- mediano, 4- fino y 5- muy fino.
 - Cada categoría anteriormente cuantificada, se dispone para determinar su masa en la balanza.
 - Se registran los resultados y se disponen para obtener sus porcentajes relativos en número y masa, así como el porcentaje verdadero de representación de cada una de las categorías en la muestra para obtener la clase o tamaño de estructura predominante.
 - Describir la estructura en el orden de: tipo, clase y grado, cada uno separado por una coma. Como ejemplo "Estructura blocosa subangular, media, moderada (2); pudiéndose omitir la palabra "estructura". Si se presenta más de un tipo, clase o grado de estructura se debe añadir dentro de la descripción. Como ejemplo "Estructura blocosa subangular, media, fuerte (3,0), que parte a granular, fina y media, moderada a fuerte (3,5)".

Preguntas:

1. Por qué la estructura del suelo puede ser afectada por el grado de humedad del suelo?

2. Por qué un ped no debe ser confundido con:

- 2.1. Un terrón originado por cualquier disturbación como arados o excavaciones

- 2.2. Un fragmento originado por la ruptura de la masa del suelo por una fuerza externa aplicada arbitrariamente.

- 2.3. Concreciones originadas por una concentración local de compuestos que tienden a cementar entre si las partículas del suelo.

3. Relacione color, textura y estructura del suelo en el contexto del manejo de sitio para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas.

DENSIDAD DEL SUELO

La densidad de las partículas o densidad real se define como la relación entre la masa total de sólidos y su volumen, sin considerar el espacio poroso. Se establece por la composición química y mineralógica de la fase sólida del suelo (ligada a sus proporciones relativas); por lo tanto, es una función de la densidad de los constituyentes minerales del suelo.

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad, por ello, cuando se calcula la densidad de partículas de un suelo corresponde a la densidad media de la fase sólida.

La densidad de partículas representa un valor relativamente constante para la mayoría de los suelos, donde los valores varían entre $2,60 - 2,75 \text{ g/cm}^3$. Estos estrechos límites se

deben a la fracción mineral del suelo, la cual está constituida, casi en su totalidad, por cuarzo, arcillas y algunos feldespatos, cuyas densidades se encuentran dentro de esos rangos.

En algunos casos, la presencia de cantidades poco frecuentes de ciertos minerales pesados, por ejemplo, el elevado contenido de óxidos de hierro o ferro magnésicos, magnetita, granates y epidota, inciden en densidades de partículas mayores de $2,75 \text{ g/cm}^3$. Caso contrario, si la densidad de partículas es inferior a $2,65 \text{ g/cm}^3$, el suelo podría tener un alto contenido de materia orgánica, la cual, afecta significativamente la densidad de las partículas por su menor peso, si se le compara con un mismo volumen de sólidos minerales. En los horizontes superficiales de suelos con alto contenido de materia orgánica, ocasionalmente, registran densidad de partículas cercana a $2,40 \text{ g/cm}^3$. La densidad real de los materiales orgánicos mencionan algunos valores que se encuentra entre $1,3$ y $1,5 \text{ g/cm}^3$ como el caso del humus y otros mencionan que se encuentran entre valores de $1,1 - 1,4 \text{ g/cm}^3$.

La densidad real, densidad de partículas, densidad específica o gravedad específica depende de la constitución química, mineralógica y del grado de hidratación de las partículas y corresponde a la masa total de los sólidos dividido por el volumen total de ellos, sin incluir el espacio poroso.

El conocimiento de la densidad de las partículas de suelo es importante para calcular la porosidad total del suelo junto con la densidad aparente, la concentración de sólidos suspendidos para la evaluación de la densidad en suspensión y la velocidad de sedimentación de las partículas en líquidos y gases, en la predicción de pérdida de suelo y en conservación de suelos.

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL DE PARTÍCULAS

Los métodos basados en el principio de Arquímedes no pueden dar la densidad real de los materiales porosos. Esto sucede porque parte de la porosidad es inaccesible al líquido en el que sumergimos, los poros cerrados o aquellos abiertos que no permitan la entrada del líquido o fluido. Para obtener en este caso la verdadera densidad, o mejor, el verdadero peso específico, necesitamos pulverizar el material que produzca la rotura de los pequeños poros y de los poros cerrados. El fin que se persigue con la pulverización es hacer desaparecer, los poros cerrados y poder hacer una medida del volumen que ocupa el material sólido. El líquido de inmersión penetra entre las partículas de sólido una vez que se elimina el aire que existe entre ellas.

Entre los métodos se consideran los siguientes:

- método del picnómetro
- método de volúmenes

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE DENSIDAD REAL DEL SUELO:

Instrucciones:

Se tomarán muestras de suelo a diferentes profundidades, por ejemplo dada 15 cm hasta los 60 cm y se considerarán también diferentes condiciones de sitio. Con la ayuda del manual correspondiente se aplicarán los procedimientos descritos para determinar la densidad real de diferentes clases y tipos de suelo o de diferentes horizontes en un mismo perfil de suelo.

Preguntas:

- ¿Por qué es importante estudiar la densidad del suelo?
- Si las plantaciones dendroenergéticas pueden mejorar las condiciones del suelo, establezca un protocolo que permita probar la hipótesis que las especies en un cultivo de alta densidad pueden mejorar la densidad del suelo
- Investigue en la literatura casos de modificación de la densidad del suelo con la siembra de árboles.

CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo saturado o es la habilidad del suelo saturado de permitir el paso de agua a través de él; que por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo.

Esta varía tanto en los horizontes de un mismo perfil de suelo como en diferentes clases y tipos de suelos, debido a mineralogía del suelo, materia orgánica, actividad macro y microbiológica, manejo del suelo, tipo de iones predominantes, tipo de viscosidad del fluido y otros. Además, la conductividad hidráulica saturada depende no sólo del suelo sino también del líquido que fluye. Sus unidades son de longitud por unidad de tiempo siendo común utilizar cm/s, cm/min, cm/h y m/d.

En el suelo se presenta la conductividad hidráulica tanto en un flujo saturado como en flujo no saturado y a la unión de ellas se le llama la conductividad hidráulica total. Al movimiento del agua en flujo saturado se le llama conductividad hidráulica saturada y al movimiento del agua en flujo no saturado se le llama de varias maneras (como al proceso de infiltración de agua en el suelo que es un flujo no saturado de agua) y una de ellas es conductividad hidráulica no saturada.

La conductividad hidráulica saturada se establece por definición que se presenta desde el punto de saturación hasta el punto a capacidad de campo donde se muestra un flujo de agua principalmente en los macroporos del suelo y la conductividad hidráulica no saturada se presenta desde el punto de capacidad de campo hasta el punto higroscópico donde se muestra un flujo de agua principalmente en los meso y microporos del suelo. La conductividad hidráulica saturada se ve regida fundamentalmente por la fuerza que ejerce la atracción de la gravedad hacia el centro de la tierra y la conductividad hidráulica no saturada está regida fundamentalmente por los potenciales del agua en el suelo.

La conductividad hidráulica saturada del suelo se puede medir tanto en el campo como en el laboratorio. La conductividad hidráulica del suelo se determina, en laboratorio, midiendo el tiempo que gasta en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna de él, saturado con agua; para hacer esta prueba se utilizan los permeámetros, los cuales pueden ser de cabeza constante (el más común) y de cabeza variable (especial para suelos de baja permeabilidad). Para llevar a cabo la determinación, lo más recomendable es tomar muestras, sin disturbar, en sentido vertical y replicadas por lo menos 4 veces; pueden fabricarse los cilindros con tubería de PVC o de metal, según la dureza del suelo, a los cuales se les debe biselar uno de los bordes para facilitar su penetración en el suelo.

Factores que afectan la conductividad hidráulica:

1. Textura: los suelos arcillosos generalmente tienen conductividades hidráulicas bajas comparadas con los arenosos, esto principalmente por efecto del tamaño de los poros, ya que al medirse la permeabilidad el suelo está saturado, por lo tanto la tensión de humedad es baja y su efecto es mínimo.

2. Materia orgánica: un contenido adecuado de materia orgánica favorece la permeabilidad en las capas superiores ya que mejora la estructura.
3. Propiedades físicas y químicas del suelo como: densidad aparente, estabilidad estructural, solución del suelo, expansión del suelo, actividad microbial, tamaño, forma y continuidad del espacio poroso, etc. También los suelos compactados, consolidados y adensados naturalmente tienden a tener valores bajos. La determinación de la conductividad hidráulica es un aspecto muy importante para trabajos de ingeniería de suelos, tales como sistemas de drenaje, almacenamiento de agua, programas de conservación de suelos y aguas y otros.

Para realizar la determinación de la conductividad hidráulica de las muestras, se necesita:

- Muestras indisturbadas de suelo contenidas en cilindros muestreadores de cada horizonte a analizar.
- Materiales y equipo de laboratorio que se detallan en el manual respectivo

HUMEDAD GRAVIMÉTRICA Y HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO

El agua es uno de los componentes fundamentales en la productividad de los ecosistemas en general y por lo tanto en los ecosistemas agrícolas y forestales.

El agua del suelo debe ser considerada como retenida en los poros del suelo a diferentes niveles de energía, y que al contener sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas constituye la solución del suelo. El estudio del agua del suelo nos permite comprender

los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, es decir desde la meteorización, procesos formadores, estado energético en que se encuentra el agua, capacidad de retención de los suelos como también el movimiento y disponibilidad para la planta, evaporación, drenaje etc. El agua del suelo está sujeta a niveles energéticos y toda planta, para poder absorberla, necesita superar estos niveles. Recordemos que la porosidad es el espacio vacío que queda en el suelo, donde el agua está disponible para las plantas.

La humedad en un suelo se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se puede expresar en forma **gravimétrica** o **volumétrica**. Gravimétricamente en relación a la masa del suelo (g agua/g suelo) y volumétricamente (cm³ agua/cm³ suelo) en relación al volumen del suelo. La humedad volumétrica no puede ser mayor al porcentaje de porosidad. La máxima cantidad de agua en términos volumétricos es igual al porcentaje de poros que tiene el suelo.

La humedad gravimétrica es la forma más común de expresar la humedad del suelo y se define como la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Frecuentemente se expresa en porcentaje, aunque también se puede expresar en forma adimensional.

La humedad volumétrica se define como la relación entre el volumen del agua contenido en el suelo y el volumen total de ese suelo.

Procedimiento:

- Se toma el peso húmedo de la muestra para densidad aparente
- Se toma el peso seco de la muestra para densidad aparente
- Se calcula la humedad gravimétrica
- Se calcula la humedad volumétrica con el valor de densidad aparente y humedad gravimétrica

$$\% \text{ Humedad gravimétrica} = \frac{(\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo seco}) * 100}{\text{peso suelo seco}}$$

$$\% \text{HG} = \frac{\text{Psh} - \text{Pss} * 100}{(\text{g de agua} / \text{g de suelo}) \text{ Pss}}$$

$$\% \text{ Humedad volumétrica} = \text{Densidad aparente} * \% \text{ Humedad gravimétrica}$$

$$\% \text{HV} = \text{Dap} * \% \text{HG} \text{ (cm}^3 \text{ de agua / cm}^3 \text{ de suelo)}$$

POROSIDAD DEL SUELO

El crecimiento de los árboles, del que depende su producción económica, está determinado por factores atmosféricos, biológicos y edáficos. Estos últimos son físicos y químicos, siendo los primeros las propiedades del suelo que determinan el crecimiento radicular y la dinámica del aire y del agua. Estas propiedades del suelo, están determinadas por las características cuantitativas y cualitativas del espacio del suelo no ocupado por sólidos, denominado espacio poroso.

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos, mesoporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo además, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los otros dos son los que retienen agua, donde los mesoporos son los que retienen el agua disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos, mesoporos y microporos.

La porosidad, se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros, o lo que es lo mismo, el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. Supóngase que en 10 cm³ de suelo existen 4,5 cm³ no ocupados por sólidos. La porosidad total de este suelo será 45 %. La porosidad total se determina directamente, en muestras de

suelo indisturbadas, es decir tal como están en el campo, sin ninguna deformación que altere la ubicación de las partículas sólidas, y por lo tanto los espacios que dejan entre ellas.

La porosidad depende de la textura, de la estructura materia orgánica y de la actividad biológica del suelo y otros. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los poros entre ellos pero no tan numerosos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de los poros, o si los coloidales los poseen alta cantidad de poros pero de pequeño tamaño a excepción de los suelos arcillosos bien estructurados. La materia orgánica contribuye a aumentar sensiblemente la porosidad.

La porosidad es la relación existente entre el volumen no ocupado por las partículas sólidas del suelo y el volumen total del suelo. Comprende porosidad capilar (meso y micro poros) y macroporos. La porosidad influye en:

- Capacidad de retención de agua
- Movimiento del aire en el suelo
- Movimiento del agua en el suelo
- Afecta el crecimiento radical
- Afecta permeabilidad e infiltración

El laboreo; al adicionar materia orgánica a los suelos, afecta el porcentaje de porosidad (lo incrementa). Para su cálculo se utilizan los datos de densidad real y densidad aparente utilizándose la fórmula:

$$\% \text{Porosidad} = \left[1 - \left(\frac{D_a}{D_r} \right) \right] * 100$$

$$\%P = \frac{(D_r - D_a) * 100}{D_r}$$

$$\%P = (\text{cm}^3 \text{ de poros} / \text{cm}^3 \text{ de suelo})$$

Donde:

Dr = Densidad real (g / cm³)

Da = Densidad aparente (g / cm³)

POROSIDAD DE AIREACIÓN DEL SUELO

La porosidad de aireación es la parte ocupada por aire de la porosidad total del suelo. Esta equivale a la diferencia entre el volumen de la porosidad total y el volumen de agua que contiene el suelo en el momento de la determinación de la porosidad. La porosidad de aireación se calcula a partir de los valores de la porosidad total, la humedad y la densidad del suelo y se expresa en porcentaje de volumen de este último

$$\% \text{ Aire en el suelo} = \% \text{ Poros} - \% H_v$$

$$\% \text{ Aire en el suelo} = (\text{cm}^3 \text{ de aire} / \text{cm}^3 \text{ de suelo})$$

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD GRAVIMÉTRICA, HUMEDAD VOLUMÉTRICA Y POROSIDAD DEL SUELO:

Instrucciones:

Se tomarán muestras de suelo a diferentes profundidades, por ejemplo dada 15 cm hasta los 60 cm y se considerarán también diferentes condiciones de sitio. Con la ayuda del manual correspondiente se aplicarán los procedimientos descritos para determinar la humedad gravimétrica, humedad volumétrica y porosidad del suelo.

Preguntas:

1. Porqué es importante estudiar la humedad y la porosidadsuelo?

2. Investigue en la literatura casos de modificación de porosidad con la siembra de árboles.
3. ¿Cómo es el movimiento del agua y del aire en los macroporos comparado con los microporos?

CONSISTENCIA DEL SUELO

La consistencia del suelo, es la manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro del mismo bajo varios estados de humedad, o sea, resistencia a la deformación o ruptura cuando se aplica una fuerza. La consistencia varía con la textura, materia orgánica, cantidad y naturaleza del material coloidal hasta cierto punto con la estructura y especialmente con el contenido de humedad.

La clasificación de la consistencia se hace con el suelo seco, húmedo y muy húmedo (mojado). Bajo condiciones de sequedad se dice que el suelo es blando, suave, duro, muy duro o cementado, cuando el suelo está húmedo se describe como muy friable, friable o poco friable, cuando está muy húmedo, (por encima de la capacidad de campo) se distinguen dos condiciones: plasticidad y pegajosidad. Así, se habla de suelos poco plásticos, plásticos, muy plásticos en suelos húmedos y suelos poco pegajosos, pegajosos y muy pegajosos en suelos mojados. Pueden darse condiciones combinadas como de alta plasticidad y poca pegajosidad, dependiendo de los tipos de arcillas, sus cantidades y de sus cationes adsorbidos. A mayores contenidos de humedad, el suelo se vuelve plástico y pegajoso, esto es, exhibe características de flujo. Las propiedades de viscosidad del suelo se vuelven similares a la del agua en estado líquido.

Un suelo plástico y pegajoso pierde estas propiedades, cuando su contenido de agua decrece. Adquiere entonces características de friabilidad siendo suave al tacto. Si la pérdida de agua se incrementa, el suelo pasa al estado seco volviéndose firme y más aún, duro.

Las sugerencias de clasificación de Atterberg, sin incluir el estado viscoso de los suelos, se han dividido en cuatro estados de consistencia:

Pegajosa: característica de adherencia a los objetos (consistencia en mojado)

Plástica: característica para ser moldeado (consistencia en mojado)

Suave: caracterizado por la friabilidad y la firmeza (consistencia en húmedo)

Duro: caracterizado por la soltura y la dureza (consistencia en seco)

1. CONSISTENCIA EN SECO:

En el caso de la consistencia en seco se determina la resistencia a la ruptura de los agregados y en su descripción se utilizan unos términos preestablecidos que a continuación definimos:

- **Suelto:** Se da en aquellos horizontes que carecen de estructura o la estructura que presentan es particular. No existen agregados en el suelo y falta cohesión entre ellas.
- **Blando:** Los agregados se rompen fácilmente entre los dedos en granos simples. Este tipo de consistencia suele estar asociado a estructuras migajosas o granulares.
- **Ligeramente Duro:** Se requiere de una ligera presión para romper el material, es decir, que es débilmente resistente a la presión del pulgar y el índice.
- **Duro:** Los agregados se rompen con dificultad entre ambos dedos y resiste moderadamente la presión.

- **Muy duro:** Los agregados se rompen difícilmente entre ambas manos pues presenta una resistencia elevada a la presión.
- **Extremadamente duro:** Los agregados no se pueden romper entre ambas manos y es extremadamente resistente a la presión. No se puede romper en la mano y algunas veces es necesario recurrir al martillo para desmenuzarlos.

2. CONSISTENCIA EN HÚMEDO:

En la determinación de la consistencia en húmedo se estima el contenido en humedad del suelo comprendido entre su sequedad y la humedad de la capacidad de campo. Los diferentes grados de determinación son:

- **Suelto:** Sin coherencia
- **Muy friable:** Los agregados se rompen fácilmente entre el pulgar y el índice mediante una muy ligera presión. No obstante se une cuando se comprime.
- **Friable.** Se necesita una ligera presión entre el pulgar y el índice para romper los agregados.
- **Firme.** Se requiere de una moderada presión para romper los agregados. El material se desmenuza bajo fuerte presión entre el índice y el pulgar, notándose una clara resistencia.
- **Muy firme.** El material se desmenuza bajo fuerte presión, apenas desmenuzable entre el pulgar y el índice
- **Extremadamente firme.** El material se desmenuza solamente bajo una presión muy fuerte y se debe romper pedazo a pedazo

3. CONSISTENCIA EN MOJADO:

En la determinación de la consistencia en mojado, se estima la adhesividad y la plasticidad de los diferentes materiales y se suele realizar cuando la humedad del material está al nivel de la capacidad de campo o ligeramente superior.

- **Adhesividad:** La adhesividad o “pegajosidad” es la cualidad por la cual los materiales del suelo se adhieren a otros objetos. Se determina notando la adherencia del material cuando es presionado entre el pulgar y el índice.
- **No adherente:** No existe adhesión natural del material de suelo a los dedos.
- **Ligeramente adherente:** Cuando sobre el material del suelo aplicamos una pequeña presión, el suelo se adhiere a ambos dedos. No obstante al separarlos, uno de ellos queda limpio.
- **Adherente.** En el momento de aplicar la presión, el material se adhiere a ambos dedos y tiende a estirarse un poco y a partirse antes de separarse de cualquiera de los dedos.
- **Muy adherente:** Bajo presión, el material del suelo se adhiere fuertemente a ambos dedos y cuando se separa se observa un estiramiento del material.
- **Plasticidad:** La plasticidad es la cualidad por la que el material edáfico varía de forma bajo la presión aplicada, manteniéndose dicha forma después de eliminar la presión. Se determina arrollando el material entre el pulgar y el índice.
- **No plástico:** Al enrollar el material entre las manos no se puede formar un cordón.
- **Ligeramente plástico:** Al enrollar el

material entre las manos se forman pequeños cordones (longitud < 1 cm)

- **Plástico:** Se puede formar cordones largos (longitud >1 cm) y se precisa de una presión moderada para deformar el bloque de material moldeado.
- **Muy plástico:** Se forma fácilmente un cordón y se requiere mucha presión para de formar un bloque de material moldeado.

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia: se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semi-sólido, plástico, semi-líquido y líquido o viscoso.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE DE PLASTICIDAD, ÍNDICE DE FLUJO, ÍNDICE LÍQUIDO, EL PUNTO ADHESIVO DEL SUELO Y EL LÍMITE DE CONTRACCIÓN.

Instrucciones:

Se tomarán muestras de suelo en diferentes condiciones de sitio. Con la ayuda del manual correspondiente se aplicarán los procedimientos descritos para determinar límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, índice de flujo, índice líquido, el punto adhesivo del suelo y el límite de contracción.

Preguntas:

- ¿Por qué es importante estudiar la consistencia del suelo?
- Investigue en la literatura casos de

modificación de porosidad con la siembra de árboles.

SALINIDAD DEL SUELO

Se puede estimar la salinidad del suelo midiendo la conductividad eléctrica del extracto del suelo. La salinidad es determinada por convención en extractos acuosos de una pasta saturada que puede tener diferentes relaciones de volúmenes como 1:1, 1:2, 1:2,5; 1:5 o 1:10 en la que (por ejemplo) esta última representa una parte de suelo por diez partes de agua. El concepto sales del suelo únicamente incluye aquellas sales más solubles que el yeso de 2 g yeso/l de agua. Así se excluyen sustancias como las calizas o el propio yeso que son sales en el sentido amplio, pero no ejercen una acción semejante a las sales que son más solubles que el yeso como es el efecto osmótico, el efecto iónico específico y el efecto del sodio intercambiable que provocan inhibición del crecimiento vegetal por estrés salino.

El efecto osmótico produce:

1. Estrés hídrico que genera la pérdida de turgencia presentando esto la inhibición de la extensión celular, inhibición de la acumulación de la clorofila en las hojas, perdida de regulación estomática
2. Modificación de la conformación proteica presentándose inactividad enzimática
3. Cambio en la permeabilidad de la membrana que provoca un déficit nutritivo

El efecto iónico específico:

1. Competencia en la absorción de nutrientes como ejemplo del potasio por el sodio y del nitrato por el cloro y provoca un déficit nutritivo
2. Cambio estructural de la membrana por excesos de sulfato

EL EFECTO DEL SODIO INTERCAMBIABLE:

1. Deterioro de las propiedades físicas del suelo que provoca una reducción del porcentaje de germinación, mayor anoxia y otros.

Las sales más comunes presentes en suelos salinos son el cloruro de sodio (NaCl), el cloruro de magnesio ($MgCl_2$), el sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y el sulfato sódico (Na_2SO_4). Los principales cationes presentes en suelo son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

Los principales aniones presentes en el suelo son: HCO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , y NO_3^- .

Existe tanto salinidad natural como salinidad adquirida. La salinidad natural del suelo es un fenómeno que es asociado principalmente a condiciones climáticas de aridez y a la existencia de materiales originales ricos en sales como sucede con ciertas rocas. La salinidad adquirida proviene normalmente de riegos prolongados con aguas de elevado contenido de sales, así como también; riego con agua de buena calidad pero con un mal manejo bajo climas secos, semi- húmedos o semi-secos y con la falta de un drenaje apropiado en el suelo para lixiviar las sales. La salinidad es el mayor problema que prevalece y se extiende y que limita la producción en la agricultura y forestal bajo riego como la no regada.

El problema de salinidad de mayor importancia económica se presenta cuando a consecuencia de la irrigación, un suelo no salino se convierte en salino debido a la deposición de las sales del agua de riego, La salinidad de los suelos puede producirse por diversas causas, que se pueden agrupar en dos tipos:

- **Causas naturales:** la degradación natural de las rocas y minerales; la actividad volcánica; el movimiento de sales por el

viento; la cercanía del mar que contiene sales en gran cantidad; resultado de fenómenos biológicos; climas áridos de fuerte evapotranspiración donde las sales se acumulan, etc.

- **Causas humanas:** Son debidas a la acción del hombre en el medio ambiente y éstas pueden ser: la generación de sal es producto de los residuos de la industria; el riego con disoluciones muy salinas o aguas de mala calidad, y de forma continua, en regiones áridas donde la escasez de lluvias impide el lavado de los suelos y las sales tienden a acumularse formando costras impermeables.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA SALINIDAD DEL SUELO Y SU EFECTO

Instrucciones:

Se tomarán muestras de suelo en diferentes condiciones de sitio. Con la ayuda del manual correspondiente se aplicarán los procedimientos descritos para determinar la conductividad eléctrica (CE) del KCl 0,01N (cloruro de potasio) a $25\text{ }^\circ\text{C}$ = 1,413 $\mu\text{mhos/cm}$ y medir la conductividad eléctrica (CE) del cloruro de potasio 0,01N en $\mu\text{mhos/cm}$ a temperatura ambiente.

Pregunta:

1. ¿Por qué la conductividad es un buen indicador del contenido de sales en los suelos?

Entre un suelo arcilloso y otro arenoso, cuál es más perjudicial el efecto de las sales.

MEDIDA EN AGUA DEL PH DEL

SUELO RELACIÓN SUELO / AGUA 1:1, 1:2,5, 1:5 Y 1:10

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo muy posiblemente de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua y expresado en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14.

Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad.

La escala de pH está comprendida de 0 a 14. Los valores de pH mayores de 7 son básicos y los menores de 7 indican que son ácidos, esto es donde la concentración de iones de hidrógeno (H^+) es mayor que la de iones OH^- . El pH de la mayoría de los suelos destinados a plantaciones dendroenergéticas fluctúa entre 4.5 y 8.5. La importancia de conocer el pH del suelo radica en que dependiendo su valor, se afecta la disponibilidad de ciertos nutrientes y provoca la solubilidad de otros elementos que pueden ser tóxicos. En los suelos existen dos tipos de acidez: 1- activa y 2- de reserva.

La acidez activa son los iones presentes en la solución del suelo en condiciones normales de equilibrio. Cuando el pH es medido en agua, el valor obtenido refleja los iones de hidrógeno presentes en la solución

IMPORTANCIA DEL PH

Un suelo ácido, (pH menores de 6.5) puede provocar una toxicidad de H, Fe y Mn; muy ácidos (pH menores de 5.5) puede provocar toxicidad de Al para las plantas, mientras que para un suelo básico (pH mayores de 7.5), se pueden tener problemas con la succión del agua por las raíces de la planta y toxicidad de Na.

Suelos fuertemente ácidos (pH 4 - 5) generalmente tienen altas y tóxicas concentraciones de aluminio y manganeso.

Además afecta la disponibilidad de nutrientes por ejemplo el P se vuelve insoluble al formar compuestos con el Fe y Al, los cuales son precipitados. Además hay una deficiencia de Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ . Algunas plantas como azaleas, té, piña, arándanos y algunas especies coníferas madereras toleran una acidez fuerte y crecen bien. En comparación, la alfalfa, frijoles, cebada y remolacha azucarera solamente crecen bien en suelos ligeramente ácidos a moderadamente alcalinos por su alta demanda de calcio o inhabilidad para tolerar aluminio soluble.

El pH influye en la actividad de los microorganismos benéficos, ya que la mayoría de bacterias fijadoras de nitrógeno y descomponedoras de materia orgánica no son muy activas en suelos fuertemente ácidos por lo que el proceso es obstaculizado.

Los suelos altos en calcio (áreas de baja pluviosidad) tienen pH con valores de 8.5 suelos con pH mayores de 10 se dan cuando presentan alto sodio intercambiable. Las plantas en suelos con pH mayores de 9 usualmente tienen crecimiento reducido e inclusive mueren.

El mayor efecto de un pH alcalino es reducir la solubilidad de todos los micronutrientes (excepto molibdeno), especialmente hierro, zinc y manganeso.

También el fosfato esta algunas veces disponible para algunas plantas por su precipitación en la solución del suelo por calcio o precipitación en carbonatos de calcio sólido.

La deficiencia de hierro, asociada con suelos arcillosos húmedos altos en carbonatos, ha sido ampliamente conocida y referida como clorosis de hierro de caliza inducida. Como el zinc, hierro, manganeso y cobre tienen baja solubilidad a pH alto, la adición de fósforo generalmente disminuye más la disponibilidad de aquellos metales a la superficie de la raíz o justamente dentro de ella, precipitándolos como fosfatos insolubles.

La mayoría de los problemas causados por un pH alto se resuelven añadiendo fertilizantes especiales como quelatos solubles en agua, los cuales son estables pero complejos solubles de metal.

EFECTOS TÓXICOS DEL AL

El Al es un metal tóxico y el primer síntoma de su existencia es el descenso del crecimiento en longitud de las raíces. El Al puede actuar a dos niveles: 1) Inhibición del alargamiento celular. 2) Inhibición de la división celular.

El efecto tóxico del Al puede provenir de su unión a moléculas orgánicas, se une a grupos carboxilo, sulfato y fosfato. El catión Al^{3+} puede afectar a las membranas alterando su fluidez, se da por la unión del Al^{3+} a las cargas negativas externas del plasma, cambios en las propiedades de la membrana. También es tóxico cuando penetra en el interior celular, pero se desconoce en qué forma penetra. Un lugar bastante afín al Al^{3+} es el núcleo, donde se une a los PO_4^{3-} de los ácidos nucleicos afectando a la división celular y a la transpiración. Se han estudiado las interacciones del Al^{3+} con Ca^{2+} y Mg^{2+} . El Al^{3+} puede desplazar al Ca^{2+} en la membrana entra el Ca al interior celular produciendo la cascada de señales no deseada. En cuanto al Mg^{2+} , el Al^{3+} puede actuar como antagonista. La toxicidad del Al^{3+} puede inducir deficiencia

en Mn^{2+} , Ca^{2+} y P, ya que si el Al se une a grupos PO_4^{3-} se puede formar $AlPO_4$ y limitará los fosfatos libres necesarios para la funcionalidad de la planta. Otros efectos indirectos afectan al agua ya que actúa sobre la exploración de las raíces en busca de agua. El Al puede afectar a la nodulación de las leguminosas de manera negativa y esto se da por el cambio de la morfología radicular produciendo una inhibición de la nodulación.

En los suelos ácidos (pH bajos) pueden haber otros factores que provocan una disminución del crecimiento de la planta, por ejemplo por exceso de Mn, que causa daños en la parte aérea en la que se observan manchas necróticas, en el tallo, en las hojas se observan manchas que se rodean de un halo de necrosis y estas hojas se arrugan. Otro problema es el déficit de P que se traduce en una disminución del crecimiento y coloración verde en las hojas. Otro factor nutritivo en los suelos ácidos es que el N está en forma de amonio, mientras que en suelos alcalinos lo encontramos en forma de nitratos. Ambas formas son igualmente disponibles.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN PH DEL SUELO Y SU EFECTO

Instrucciones:

Se tomarán muestras de suelo en diferentes condiciones de sitio. Con la ayuda del manual correspondiente se aplicarán los procedimientos descritos para confeccionar mezclas de suelo/ agua destilada correspondiente a una relación 1:1, 1:2,5; 1:5 y 1:10 con base a volumen

Preguntas:

1. ¿Por qué es importante medir el pH en el estudio de las relaciones suelo-planta?
2. ¿Cree usted que el pH del suelo es estable durante todo el año o presenta fluctuaciones? ¿Qué razones daría usted a su respuesta? Explique.
3. ¿El pH afecta directa o indirectamente a las plantas? ¿Por qué?

MACROINVERTEBRADOS Y LOMBRICES DE TIERRA

La macrofauna del suelo incluye a los grupos de invertebrados cuyos representantes son visibles a simple vista con un tamaño > 2 mm que viven dentro del suelo o inmediatamente sobre él (ej., en la hojarasca, troncos podridos) y/o que pasan una parte importante de su ciclo de vida sobre o dentro de él. La macrofauna incluye a más de una veintena de grupos taxonómicos: lombrices de tierra, termitas, hormigas, milpiés, ciempiés, arañas, escarabajos, gallinas ciegas, grillos, chicharras, caracoles, escorpiones, cucarachas, cochinillas, tijerillas, chinches y larvas de moscas y de mariposas (Cuadro 1). De estos organismos, los escarabajos suelen ser los más diversos (con mayor número de especies), aunque en abundancia predominan generalmente las termitas y las hormigas y en biomasa las lombrices de tierra.

La abundancia de toda la macrofauna puede alcanzar varios millones de individuos ha^{-1} y su biomasa varias toneladas por ha^{-1} . Considerando la diversidad de grupos pertenecientes a la macrofauna edáfica, no es de sorprenderse que ejecutan múltiples funciones en los ecosistemas terrestres, variando desde los organismos geófagos, que ingieren suelo (generalmente lo escogen para concentrar la materia orgánica humificada y/o raíces muertas); los detritívoros, descomponedores o desintegradores, que se alimentan de material vegetal o animal en descomposición (carroñeros o necrófagos); los fitófagos y rizófagos, se alimentan de plantas vivas (raíces o partes aéreas); los depredadores, se alimentan de otros organismos; los omnívoros, comen todo tipo de alimento, tanto de origen vegetal como animal; y los parásitos, que viven a cuenta de otros

De acuerdo con su distribución en el perfil del suelo y a su estrategia de alimentación a los invertebrados edáficos se les ha clasificado en tres categorías ecológicas principales:

- a. **Epigeos (habitantes de la hojarasca):** viven y comen en la superficie del suelo; la mayor parte se alimenta de material orgánico no descompuesto (hojarasca) liberando nutrimentos. Son macroartrópodos detritívoros, como pequeñas lombrices pigmentadas, arañas, hormigas, ciempiés y algunos escarabajos depredadores del resto de la fauna. La principal función de los epigeos es fragmentar la hojarasca y promover su descomposición.
- b. **Endógeos (habitantes del interior del suelo):** representados principalmente por las lombrices de tierra y termitas, viven y se alimentan de materia orgánica o de raíces; ingieren grandes cantidades de suelo para alimentarse, producen galerías y abundantes excretas que afectan la estructura del suelo.
- c. **Anécicos (habitantes de las partes profundas y de la hojarasca):** representados por lombrices, termitas y hormigas, se alimentan principalmente de la hojarasca de la superficie, viviendo en el suelo formando redes semi-permanentes de galerías y nidos; para construirlas ingieren y transportan gran cantidad de suelo que altera la agregación y promueve la oxigenación e infiltración de agua. La principal función de los anécicos es la de transporte y mezcla de la hojarasca, cambiando la dinámica de su descomposición y su distribución espacial.

Dentro de los macroinvertebrados edáficos, las lombrices de tierra (Oligoquetos), las termitas y las hormigas realizan un papel preponderante en los procesos físicos del

CUADRO 1. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LOS PRINCIPALES GRUPOS DE MACROINVERTEBRADOS EN EL SISTEMA EDÁFICO

Grupo	Nombre común	Grupos funcionales
Coleoptera	Escarabajos, gallinas ciegas	Rizófagos, depredadores, detritívoros, Fitófagos
Oligoqueta	Lombrices de tierra	Geófagos, detritívoros, omnívoros
Isoptera	Termitas	Geófagos, detritívoros, rizófagos, fitófagos
Formicidae	Hormigas	Fitófagos, depredadores, detritívoros, omnívoros
Chilopoda	Ciempíes	Depredadores
Diplopoda	Milpiés	Detritívoros
Hemiptera	Chinches	Rizófagos, fitófagos, depredadores
Homoptera	Chicharras, loritos	Rizófagos, fitófagos, detritívoros,
Orthoptera	Grillos, salta montes	Rizófagos, fitófagos, detritívoros, omnívoros
Diptera	Moscas, mosquitos	Detritívoros, depredadores, parásitos
Aranae	Arañas	Depredadores
Opiliones	Arañas patonas	Depredadores
Lepidoptera	Mariposas, orugas	Fitófagos
Blattidae	Cucarachas	Fitófagos, detritívoros, omnívoros
Isopoda	Cochinillas	Detritívoros
Scorpionidae	Escorpiones	Depredadores
Pseudos-scorpionidae	Falso-escorpión	Detritívoros, depredadores
Gasteropoda	Caracoles	Fitófagos, detritívoros
Dermaptera	Tijerillas	Detritívoros, depredadores
Thysanura y		
Archaeognata	Pececillos de plata	Detritívoros
Diplura		Depredadores

Modificado de Brown et al., (2001).

suelo y en la distribución de recursos en el ambiente edáfico, por ello, han sido consideradas como “ingenieros del ecosistema”. Considerando su importancia ecológica, estudiar la composición de la macrofauna en distintos ecosistemas es, por lo tanto, un importante punto de partida para entender sus efectos potenciales en el medio edáfico y en la productividad vegetal. Debido a que cada organismo puede tener una influencia distinta sobre los procesos edáficos y la productividad vegetal, su abundancia o biomasa puede llegar a umbrales importantes, tanto positivos como negativos.

Los macroinvertebrados edáficos constituyen un indicador útil de la salud del suelo o del estado de perturbación del mismo, debido a que estos organismos son sensibles a una gama de propiedades del suelo y del ambiente/ecosistema y al manejo impuesto por el ser humano. Además, juegan un papel importante en la regulación de la estructura y función de los suelos de ecosistemas agrícolas y forestales, presentan una distribución amplia y son abundantes. Los macroinvertebrados se reconocen como indicadores exitosos por su distribución generalista, versatilidad, respuesta a la perturbación, significancia estadística, abundancia y relativa facilidad

de muestreo. La abundancia, la biomasa, los grupos funcionales y la diversidad de macroinvertebrados edáficos pueden usarse como indicadores para monitorear cambios cuantitativos y cualitativos del ambiente afectados por el uso del suelo.

Diversos estudios coinciden en señalar los siguientes criterios para elegir especies o grupos indicadores de salud del suelo:

1. Estar bien correlacionado con los procesos del suelo.
2. Compatibilidad con indicadores físicos y químicos de la salud del suelo, permitiendo una estimación de las propiedades o funciones del suelo difíciles de medir directamente.
3. Sensibles a las variaciones en las prácticas de manejo y el clima.
4. Facilidad de evaluación o medida, accesibles para especialistas y productores.
5. Robusta metodología con técnicas de muestreo estandarizadas, de bajo costo y con alta efectividad.

De los grupos de macroinvertebrados edáficos las lombrices de tierra han recibido mayor atención. Sin embargo, varios autores señalan que la abundancia y/o composición de especies de oligoquetos no siempre indican la salud del suelo; por otra parte, se señala que el número de especies nativas o exóticas puede ser un indicador válido del nivel de perturbación de cierto ambiente. Cuanto mayor el número de especies nativas y menor el de exóticas, menor es el nivel de perturbación.

Las lombrices también presentan las siguientes funciones y/o características como bioindicadoras:

1. Acumulan metales pesados en su biomasa y por lo tanto, pueden ser utilizadas macroinvertebrados del suelo y lombrices de tierra como indicadoras de calidad del ambiente en particular en sitios contaminados;
2. Favorecen la agregación del suelo y mejoran su estructura;
3. Pueden ser utilizadas para el tratamiento de desechos orgánicos (lombricompostaje);
4. Favorecen el mantenimiento de la fertilidad del suelo por su participación en la liberación de nutrimentos como el nitrógeno y el fósforo

TÉCNICAS DE MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS EDÁFICOS

Existen varios métodos de colecta de los macroinvertebrados edáficos, aunque los más comunes normalmente incluyen colecta del material (suelo, hojarasca) y separación manual, o la expulsión de los individuos usando fuentes de calor y embudos para colectar a los individuos. La escala del estudio y los grupos principales de interés dictarán el método de preferencia y la fuente principal (suelo, hojarasca o los dos) de colecta. Si el objetivo es estudiar invertebrados activos en la superficie del suelo, los métodos preferentes serán el uso de trampas de queda ("pitfall traps") que colectan a los organismos que se mueven en la superficie el suelo (Figura 1). Esas trampas pueden incluir sebos (por ejemplo heces de animales, sardina, atún, carne o miel), cuando se busca estudiar un grupo en particular como por ejemplo, insectos carroñeros o carnívoros como hormigas o escarabajos. Los recipientes normalmente son de capacidad de 500 mL, pueden ser de plástico (preferentemente) o de vidrio y deben estar al ras de la superficie del suelo u hojarasca.

Como el diámetro interfiere en la captura de la fauna, es recomendable siempre usar recipientes del mismo diámetro. También se recomienda perturbar lo mínimo posible el suelo al enterrar el recipiente. Después de la instalación, espere tres días para iniciar el estudio, para evitar posibles influencias de la perturbación. El líquido conservador puede ser una mezcla de soluciones acuosas incluyendo formol o alcohol y debe incluir siempre algunas gotas de detergente casero con el fin de romper la tensión superficial para que los invertebrados se hundan en el líquido. Si el recipiente es de 500 mL, usar aproximadamente 150 mL de solución conservante.

La cobertura de la trampa (Figura 1) es importante para evitar que la lluvia diluya o haga traspasar el líquido conservante. El tiempo de permanencia de las trampas en campo puede variar según el objetivo del estudio: normalmente una semana es suficiente para coleccionar la mayor parte de los invertebrados epigeos. Una vez agotado el tiempo, se vacía el contenido de las trampas en un frasco, el cual, es llevado al laboratorio donde se cambia el líquido conservador por alcohol al 70%, seguido de la identificación de los invertebrados coleccionados usando una lupa o microscopio estereoscópico.

EJERCICIO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO:

Instrucciones:

Siguiendo el protocolo descrito se realizará un muestreo para determinar las diferencias en la macrofauna en un sitio cubierto por parcelas de alta densidad y las áreas aledañas con otro tipo de cobertura (bosque, pastos, uso agrícola)

Preguntas:

- Porqué es importante estudiar considerar la macrofauna del suelo?
- Si las plantaciones dendroenergéticas pueden mejorar las condiciones del suelo, establezca un protocolo que permita probar la hipótesis que las especies en un cultivo de alta densidad pueden mejorar la calidad biológica del suelo
- Investigue en la literatura casos de modificación de calidad biológica del suelo con la siembra de árboles.

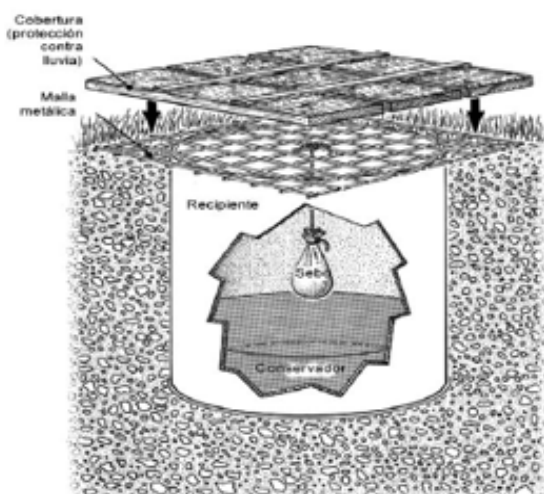


FIGURA 1. MÉTODO DE COLECTA PARA LA CAPTURA DE MACROINVERTEBRADOS USANDO TRAMPAS DE QUEDA ("PITFALL TRAPS") INSTALADAS EN EL SUELO. EN ESE CASO, LA TRAMPA INCLUYE UNA COBERTURA (PARA PROTECCIÓN DE LA LLUVIA) Y UN SEBO PARA ATRAER A INVERTEBRADOS ESPECIFICOS.

Modificado de Bautista et al, 2000)

Cuando se desea estudiar la fauna presente en la hojarasca, los mejores métodos de colecta son el uso de los aparatos de Winkler, Berlese o Tullgren, que secan la hojarasca progresivamente, forzando a los insectos a moverse hacia abajo dentro del embudo y caer en un frasco lleno de alcohol al 70% para almacenar los individuos (Figura 2). Los embudos de Berlese y Tullgren utilizan una lámpara para secar la hojarasca, mientras que el aparato o bolsa de Winkler no lo necesita. Esos métodos han sido muy utilizados para coleccionar principalmente a los macroartrópodos epigeos.

Se recomienda tomar por lo menos de 5 a 10 muestras de hojarasca en una superficie mínima de 50 × 50 cm por ecosistema y colocarla en el Winkler o un Berlese/Tullgren de mayor tamaño (diámetro del embudo mayor que 40 cm) durante una semana. Al final de ese período, se recogen y tapan los frascos que pueden ser procesados posteriormente para la identificación de la fauna.

Para el muestreo de la macrofauna del suelo en general, el método más utilizado ha sido el publicado en el manual del Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) Program (Anderson e Ingram, 1993) con el cual se hacen monolitos de 25 * 25 cm cuadrados hasta los 30 cm de profundidad (Figura 3). El monolito es separado del suelo usando palas rectas con o sin la excavación de suelo alrededor del monolito. La hojarasca arriba del monolito es retirada y revisada manualmente para coleccionar a todos los individuos epigeos.

Éstos son almacenados en un frasco con alcohol al 70% (o formol al 4% para las lombrices). Una vez separado el monolito del suelo circundante, se le separa en 3 niveles o capas del suelo de 10 cm cada una, para poder distinguir la distribución vertical de la fauna en el suelo. El suelo de cada capa puede ser almacenada en una cubeta hasta ser revisada. Cada capa es entonces revisada manualmente en charolas de plástico

(preferentemente) o de metal de tamaño aproximado de 40 cm × 50 cm. Se toman pequeñas porciones del suelo cada vez (2 o 3 puñados de suelo) y toda la fauna es retirada y colocada en formol al 4% (lombrices de tierra) o alcohol al 70% (resto de la macrofauna). Se pueden utilizar pinzas y/o pinceles para coleccionar a la fauna, pero para las lombrices se recomienda usar sólo las manos. Posteriormente, se identifican los individuos coleccionados en el laboratorio usando una lupa estereoscópica.

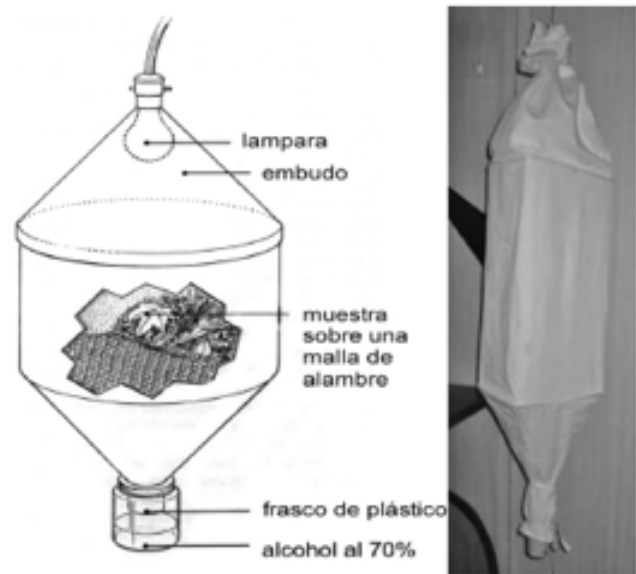


FIGURA 2. DIAGRAMA DE UN APARATO DE TULLGREN (IZQUIERDA) Y FOTO DE UN COLECTOR TIPO WINKLER (DERECHA) USADOS PARA COLECTAR PRINCIPALMENTE FAUNA DE LA HOJARASCA, O DE LA CAMADA SUPERFICIAL (0-5 O 0-10 CM) DEL SUELO.

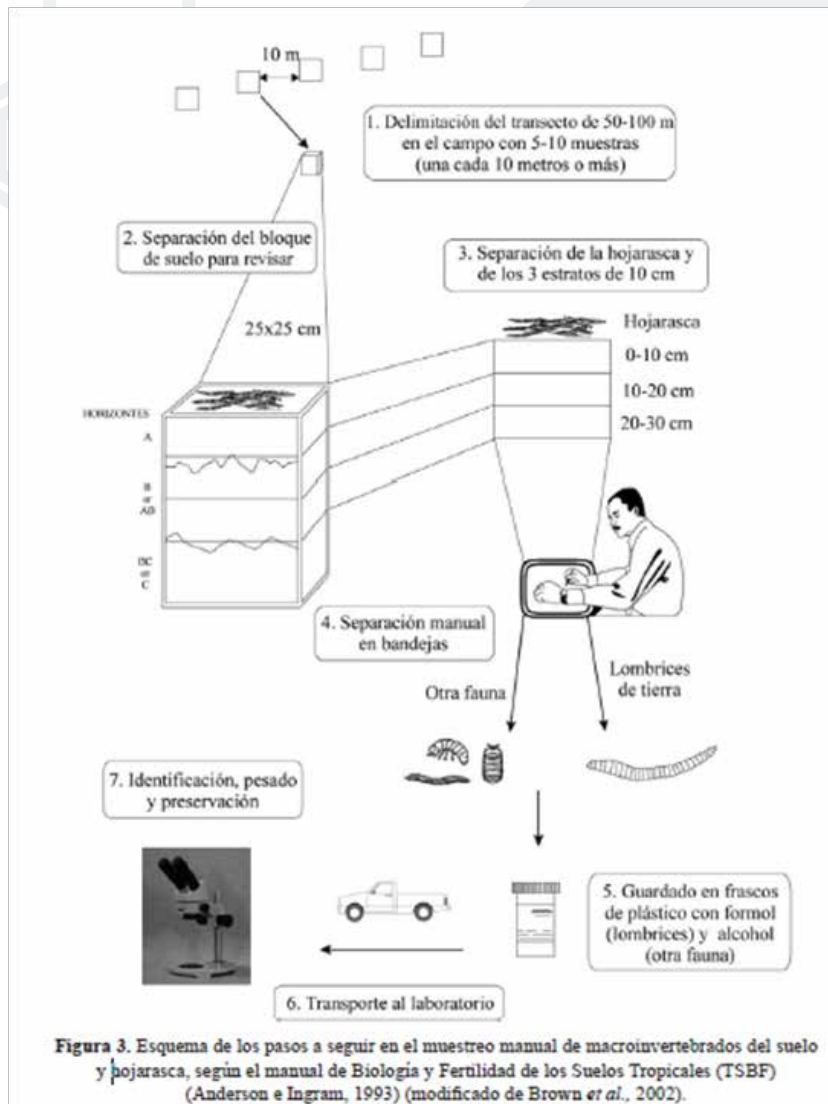


FIGURA 3. ESQUEMA DE LOS PASOS A SEGUIR EN EL MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS DEL SUELO Y HOJARASCA, SEGÚN EL MANUAL DE BIOLOGÍA Y FERTILIDAD DE LOS SUELOS TROPICALES (TSBF)

(Anderson e Ingram, 1003) (modificado de Brown *et al.*, 2002)

NÚMERO DE MUESTRAS POR SITIO

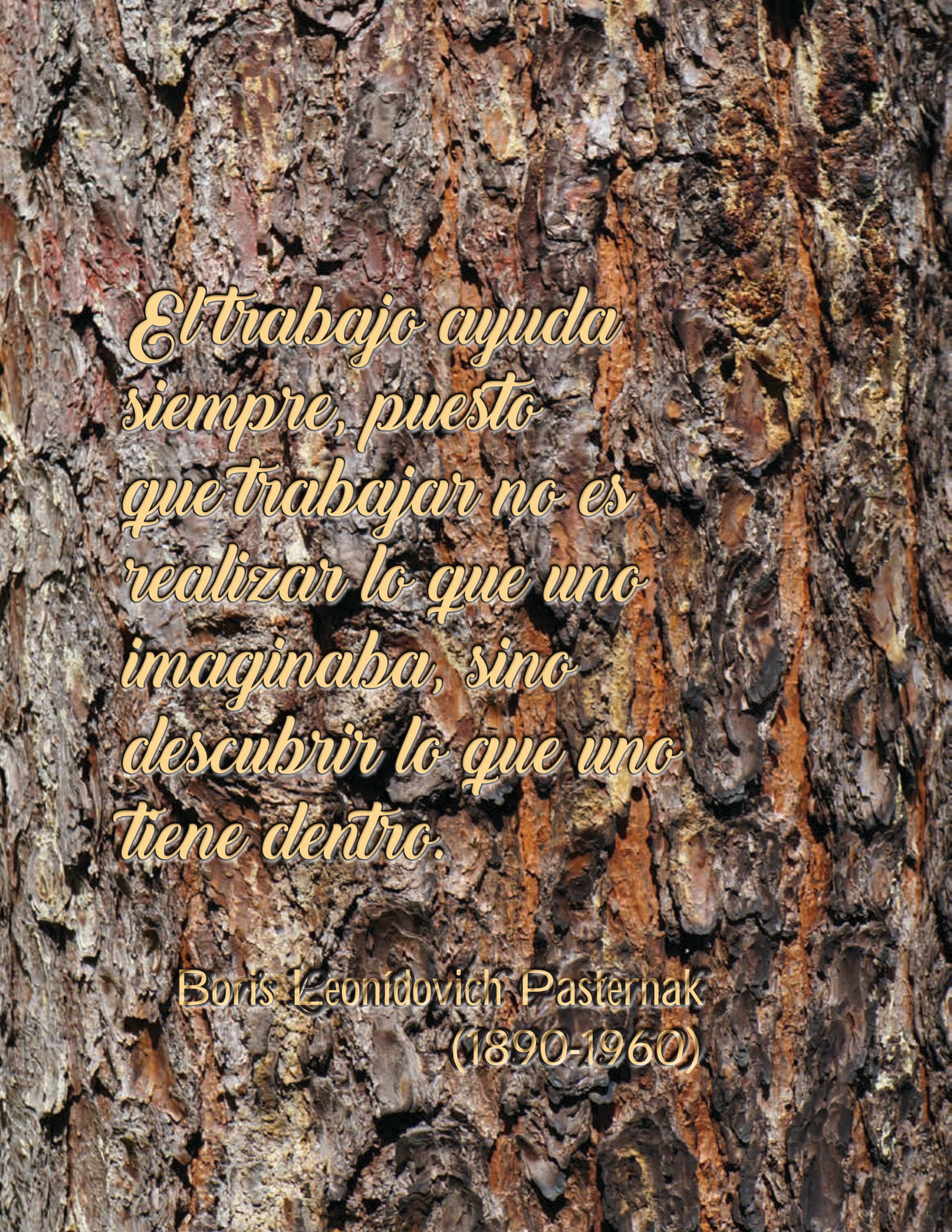
El número de muestras necesarias en cada parcela o unidad experimental puede variar conforme los objetivos del estudio, el tamaño de las muestras y el tamaño y número de parcelas a ser estudiadas. Sin embargo, cuando se desea comparar poblaciones en diferentes sistemas de uso del suelo en una misma localidad en un mismo estudio, se recomienda tomar el mismo número de muestras en todos los sitios/locales estudiados.

La distribución espacial de las muestras debe, preferentemente, buscar la representatividad del ambiente específico a ser muestreado; una de las distribuciones más típicas de muestreo en una parcela es la de "x" o de "W", con 5 puntos de muestreo, siendo una muestra en cada punta y una en medio.

En el método del TSBF, se realiza un transecto de 25 a 50 m de largo con 5 a 10 monolitos, distantes uno de otro con 5 m. Sin embargo, los monolitos también pueden ser colocados al azar sobre la parcela si son observadas a la distancia mínima. Se sugiere un transecto de 40 m con 8 monolitos separados con 5 m cada uno. Sin embargo, a esta distancia existe alta probabilidad de auto-correlación de los datos, o sea que no existiría independencia

entre las medidas/los monolitos. Esa independencia es crucial para considerar las muestras como distintas para un análisis de variancia. Por lo tanto, distancias de por lo menos 10 m y preferiblemente mayores que 20 m son mejores pues sobrepasan las “manchas” de distribución agregada de los organismos mayores como las lombrices de tierra. El número de las trampas de queda en el campo puede variar según el objetivo del estudio: se sugiere la utilización de 15 o 20 trampas distribuidas en una malla de 3 o 4 × 5 trampas con una distancia de por lo menos 10 m (y preferentemente 20 a 30 m) entre las trampas, para evitar la autocorrelación entre las muestras.

Especial atención debe tomarse para el hecho de que cada serie de muestras en cada localidad específica son en realidad pseudo-repeticiones de las repeticiones (unidades experimentales). Las unidades experimentales son el sistema de uso del suelo de la localidad y es importante que se busque hacer duplicados de cada uno de estos sistemas, para tener verdaderas repeticiones. En principio se debe tener por lo menos tres repeticiones de cada tratamiento o sistema de uso del suelo estudiado. Siendo así, si se desea comparar la fauna del suelo en un ecosistema agrícola y uno natural, los muestreos deben ser realizados en por lo menos tres localidades con el mismo tipo de sistema agrícola y en tres fragmentos distintos de vegetación natural.



*El trabajo ayuda
siempre, puesto
que trabajar no es
realizar lo que uno
imaginaba, sino
descubrir lo que uno
tiene dentro.*

*Boris Leoníдовich Pasternak
(1890-1960)*

BIBLIOGRAFÍA DE APOYO



- BENGOUGH, A., MULLINS, C. 1991 Penetrometer resistance, root penetration and root elongation rate in two sandy loam soils. Pl. Soil 131:59-66.
- EHLERS, W., KÖPKE, U., HESSE, F., BÖHM, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil Till. Res. 3:261-275
- Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. Centro Interamericano de documentación. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de Costa Rica.
- Foster; B. 1964. Métodos Aprobados en Conservación de Suelos Centro Regional de Ayuda Técnica (A.I.D.) México.
- González, M. 1975. Manual de Laboratorio de Edafología. Publicaciones de la Universidad de Costa Rica, San José Costa Rica.
- Hesse, P.R. 1971. A Textbook Of Soil Chemical Analysis Chemical Publishing. Co. Inc. New York, U.S.A.
- Jackson, M.L. 1958. Soil Chemical Analysis Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. N.Y.
- MARTINO, D., SHAYKEWICH, C. 1994. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. Can. J. Soil Sci. 74:193-200.
- TAYLOR, H., GARDNER, H. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. Soil Sci. 96:153- 156.
- TAYLOR H. ROBERSON, G., PARKER, J. 1966. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. Soil Sci. 102:18-22.
- Yúfera E.P. 1973. Química Agrícola 1. Suelos y Fertilizantes Editorial Alhambra. España.

Ciencia es el arte de crear ilusiones convenientes, que el necio acepta o disputa, pero de cuyo ingenio goza el estudioso, sin cegarse ante el hecho de que tales ilusiones son otros tantos velos para ocultar las profundas tinieblas de lo insondable.

Carl Gustav Jung (1875-1961)

MUESTREO A NIVEL DE CAMPO Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

El suelo es uno de los factores clave para el crecimiento y rendimiento de los cultivos dendroenergéticos. Es también uno de los factores que permite tomar decisiones antes y posterior al establecimiento de plantaciones y permite el monitoreo del impacto del cultivo forestal sobre la recuperación o degradación del sistema productivo. Para su entendimiento existen muchas variables clave que pueden ser determinadas a nivel de laboratorio; sin embargo la utilidad en la interpretación de sus resultados está estrechamente vinculada con la validez estadística, es por ello que las técnicas de muestreo cobran relevancia y deben ser entendidas y utilizadas correctamente. En esta unidad el estudiante profundizará en las técnicas de muestreo desarrolladas para la evaluación de los suelos.

DESARROLLO DE CONTENIDO

¿Por qué aplicar métodos de muestreo?

Los tipos de estudios sobre el manejo de los recursos naturales pueden ser tan variados como todas las ciencias que le confieren una identidad multidisciplinaria. Existe, además, una gama amplia de posibles limitaciones en el procedimiento de muestreo, que varían de una ciencia a otra. En algunas áreas que comparten conceptos y métodos de investigación con las ciencias físicas, tales como la biotecnología o la fisiología, es frecuente la realización de experimentos, en donde el muestreo frecuentemente puede ser ejecutado bajo condiciones controladas. Tal control es más difícil en ciencias en donde lo más común es realizar estudios bajo condiciones “naturales”. Disciplinas como ecología, agronomía, ciencias forestales, etc., requieren generalmente de este segundo tipo de estudios que podrían catalogarse como “cuasi-experimentales”. Más aún, hay áreas multidisciplinarias que combinan

el componente biológico con las ciencias sociales o económicas (p.e., etnobiología, economía ambiental, etc.) cuyo enfoque de investigación se basa en estudios de tipo “cuasi-experimental” o definitivamente observacional, en donde el control de variables es prácticamente imposible.

Las diferencias entre los distintos campos de las ciencias que auxilian al profesional en manejo de recursos naturales no solamente se han de atribuir al tipo de estudio, observacional, cuasi-experimental o experimental, sino también a las diferencias en el muestreo como consecuencia de la naturaleza misma de las poblaciones.

Algunas poblaciones son finitas, otras son lo suficientemente grandes como para considerarse infinitas, mientras que otras son conceptuales, prácticamente infinitas. Por ejemplo, en los estudios observacionales de grupos humanos o de mamíferos silvestres (p.e., venados, jaguares), los tamaños poblacionales son finitos. En cambio, en los estudios experimentales las poblaciones son conceptuales, en el sentido de que en un experimento, una muestra de valores de una variable de respuesta es un subconjunto de posibles valores de una población (conceptual) que se generaría si fuéramos capaces de realizar infinidad de veces el mismo experimento, bajo las mismas condiciones. En contraste, se pueden usar herramientas tales como el muestreo aleatorio y el sistemático para la selección de muestras en el estudio de suelos, evidentemente finitas. En esta unidad revisaremos conceptos y métodos estadísticos básicos de muestreo con la ayuda de un libro editado por el CATIE y que profundiza en el tema, ver:

MUESTREO A NIVEL DE CAMPO Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES

Cuando se envían muestras de suelo a un laboratorio se esperan diversos resultados analíticos para tomar decisiones respecto al manejo del suelo. Sin embargo, tales resultados del laboratorio son útiles y contribuyen a decisiones acertadas sólo si reflejan las condiciones que representan adecuadamente a la superficie de suelo que se quiere manejar.

El resultado de un análisis de suelos no sirve si ha sido realizado sobre una muestra que no es representativa del área que se quiere analizar. Debido a la variabilidad de los suelos, es importante mencionar metodologías de toma de muestras que tengan validez general y los detalles acerca del modo de realizarlos.

El suelo experimenta variación no sólo con respecto al sitio elegido en comparación con otros lugares, sino; dentro del mismo perfil del suelo existe variabilidad con respecto a la profundidad que se tome la muestra dentro del perfil.

La muestra del suelo debe de ser referida a un volumen y no a un área (o superficie) del mismo porque el suelo tiene profundidad. Se debe recordar que al arar o cultivar el suelo se maneja un volumen de recurso edafológico que es el producto del área cultivada por la profundidad del surco. A pesar de esto, se encuentra que los resultados de los análisis químicos vienen muchas veces expresados en unidades como kilogramos de nitrógeno por hectárea (N kg/ha) y otros. Para pasar estos resultados de área a peso es necesario tener en cuenta la densidad aparente del suelo, así como la profundidad a la que se está trabajando.

FUENTE DE VARIACIÓN QUE INFLUYE EN EL RESULTADO DE UN ANÁLISIS DE SUELOS

Las principales fuentes de variación para un suelo determinado son:

1. Error en la toma de muestras
2. Error analítico

La fuente principal de errores es debida a la toma de muestras, cuyo error se considera que es unas tres veces mayor que el analítico, aun cuando se tomen toda clase de precauciones en el campo para reducir este error.

Según lo anterior, siendo mayor la variación debida a la toma de muestras para obtener un valor analítico representativo del volumen de suelo en estudio deberán tomarse varias muestras del suelo que serán reunidas después formando una muestra compuesta. Cuando las muestras del suelo se extraen se deben de identificar o rotular, que nos indique de donde fue extraída tanto de la finca como en la profundidad del perfil del suelo, para esto se puede utilizar un código alfabético, numérico o alfanumérico que mejor se adapte según conocimiento de las condiciones in situ del que está realizando el muestreo.

MUESTRA COMPUESTA

Una muestra compuesta ideal debe cumplir los siguientes requisitos:

- Cada una de las muestras originarias deben de ser del mismo volumen y representar la misma sección transversal del volumen total.
- El volumen total seleccionado para hacer de él una muestra compuesta debe ser homogéneo para el objetivo que se persigue.
- En caso de ser necesario subdividir el campo en varias parcelas si se observa heterogeneidad en topografía, color, crecimiento de las plantas y otros. En este caso se toman muestras compuestas de cada una de las parcelas por separado y se analizan independientemente.

MUESTREO DE SUELOS EN SISTEMAS DENDROENERGÉTICOS

Para realizar un muestreo de las variables básicas que influirán en la producción de dendroenergía este debe adecuado a la etapa de desarrollo y al momento de muestreo. Por otra parte debe tenerse claro que el suelo es un mosaico donde la variabilidad es lo que impera por lo que a la hora de muestrear debe tomarse en cuenta qué nivel de precisión se requiere y cuánto capital se tiene disponible, pero claramente debe tomarse los datos que podrán ser interpretados y que podría repercutir en la ganancia potencial que la reforestación podría llegar a producir (Ver figura 1).



FIGURA 1. CROQUIS Y SUBDIVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA LOS MUESTREOS DE SUELO

Seguidamente se describirán algunos tipos de muestreo que podrían ser de gran utilidad, claramente se dejarán algunos por fuera ya que por el momento no están vinculados a la productividad directamente.

MUESTREO INICIAL DE SUELOS

Previo al establecimiento de la plantación deberá de realizarse un muestreo que busca determinar las limitaciones que presenta un sitio, para ello deberá obtenerse un muestreo compuesto de 16 a 20 submuestras para cada sector previamente definido en la propiedad, cada sector deberá ser homogéneo y tener un área menor a las 20 ha. El submuestreo podrá realizarse de manera sistemática o al azar, pero deberá ser representativo del área muestreada.

El muestreo deberá realizarse a 2 profundidades (0-20 y 20-40 cm) con el fin de determinar no solo las limitaciones presentes en los primeros 20 cm sino también las que podrían estar a una mayor profundidad y afectar al cultivo en etapas sucesivas de desarrollo.

A estas muestras se les deberá realizar un análisis completo de sus principales propiedades físicas y químicas, con el fin de determinar limitaciones relacionadas con la disponibilidad del agua, crecimiento radical y las disponibilidades nutricionales del sector analizado.

Estas muestras podrán ser tomadas con barrenos muestreadores de suelo o con palas o palines, lo importante es asegurarse la representatividad de las muestras a analizar, el 60% del éxito de los trabajos posteriores dependerá de la calidad del muestreo y la representación de esta labor.

MUESTREOS DE SEGUIMIENTO

Estos muestreo buscan esclarecer 2 preguntas, la primera enfocada a si se han realizado las correcciones nutritivas de la manera correcta. La segunda es en búsqueda de explicar deficiencias nutricionales observadas en un análisis foliar, el cual se describirá más adelante.

Este muestreo de seguimiento deberá ser con los mimos cuidados que el muestreo inicial, áreas menores de 20 ha, entre 16 y 20 submuestras, 2 profundidades), y deberá además ser para un área que recibe el mismo manejo, es decir que si por alguna razón un lote ha sido cosechado en 2 años diferentes deberá mantener esa misma división para los muestreos posteriores. Para este caso los muestreos deben realizarse previo a la aplicación de cualquier enmienda o fertilizante, y preferiblemente antes de la cosecha, o al menos 6 meses posterior a la misma.

MUESTRO FOLIAR

El muestreo foliar busca de una u otra manera no solo detectar deficiencias nutricionales antes de que las misas repercutan en el crecimiento, sino también detectar fallas en las prescripciones nutricionales y de aplicación de enmiendas basadas en los análisis previos realizados.

Para realizar este muestreo no existen protocolos tan definidos como en algunos cultivos agrícolas, posiblemente si se revisan diversos autores se encontrarán diferencias en los procedimientos a seguir, sin embargo, uno de los protocolos más utilizados es muestrear hojas sanas del tercio medio y de las mitad de las ramas, con el fin de no tener problemas con el muestreo con elementos como calcio o nitrógeno que presentan un comportamiento inverso a la concentración a lo largo de la copa del árbol.

MUESTREO DE DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente está relacionada con otras propiedades del suelo como lo es la porosidad, la penetrabilidad de las raíces la infiltración y, otras. Sin embargo, para poder escalar a hectárea algunos contenidos de los elementos, como por ejemplo el carbono, es necesario realizar un muestreo para determinarla.

Para realizar un muestreo debe tenerse en cuenta como serán analizadas las muestras en el laboratorio, en esta sección explicaremos dos métodos de muestreo asociados con los dos métodos de análisis que se presentan en el manual de laboratorio.

El primer método es el método del terrón, este método es económico ya que no es necesario un barreno para muestrear densidad aparente, ni son necesarios cilindros especiales, sin embargo, se requieren una cantidad de recipientes rígidos suficiente para transportar las muestras individualmente sin que sean comprimidas en el transporte. Este método requiere solamente una pala con la que se debe cavar un hoyo para extraer un terrón a la profundidad requerida, asociada a la profundidad del muestreo químico. La cantidad de muestras dependerá del capital pero las mismas no deben ser menores a 3 en un bloque homogéneo y la cantidad estará relacionada con la variabilidad presente en las muestras tomadas.

El método del cilindro varía con el anterior en el instrumento a utilizar, para ello debe utilizarse un barreno para muestras de densidad aparente o en carencia del mismo, cilindros metálicos. En ambos casos el objetivo es introducir un cilindro en el suelo asegurándose de la menor perturbación de la muestra, ello se logra con una rápida introducción del mismo y con bordes afilados de maneta que puedan cortar raíces pero que no se doblen con las piedras o la grava presente normalmente en el suelo.

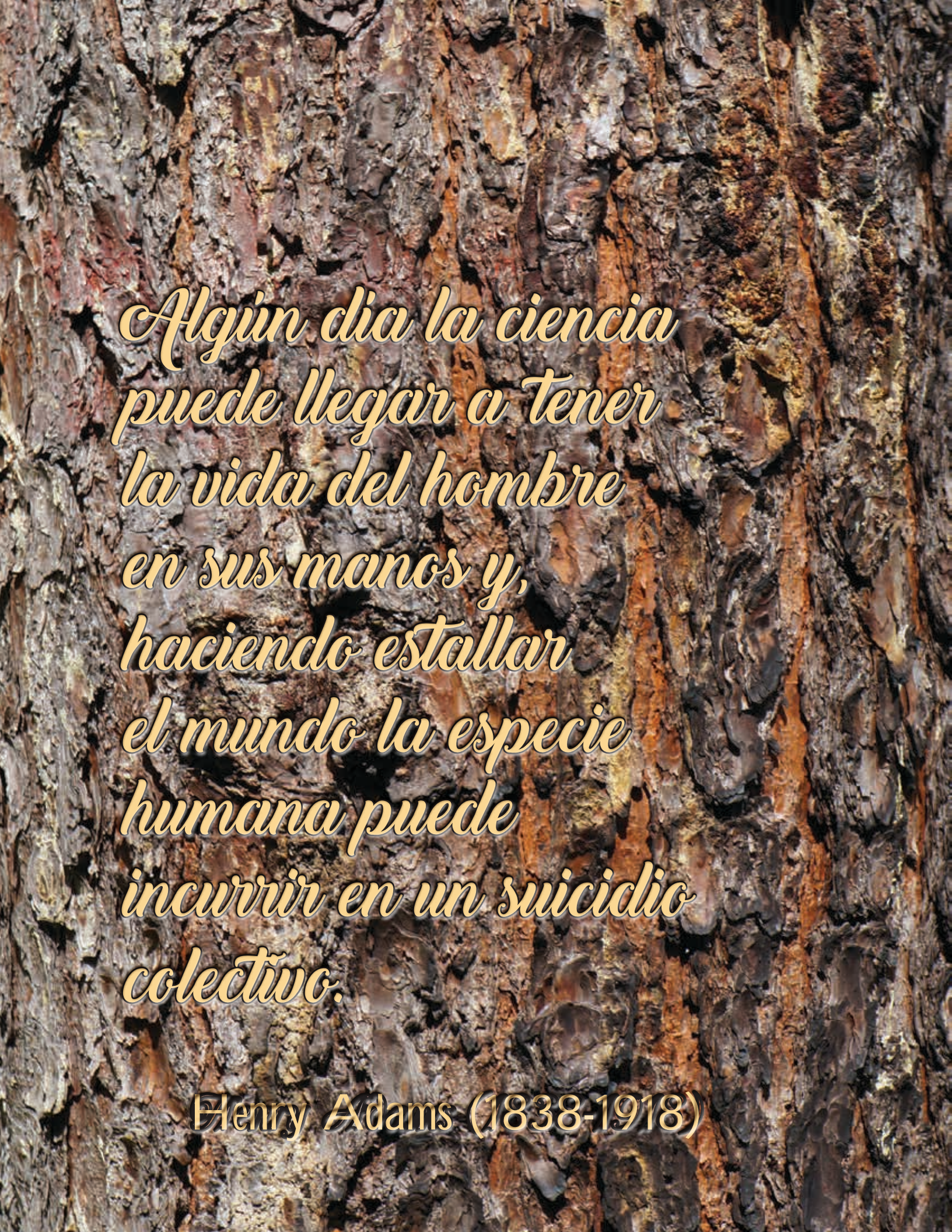
UN MUESTREO MÁS....

Muchas de las prescripciones utilizadas en el campo forestal consiste en describir una calicata, ella nos brinda información con respecto a la clasificación del suelo, la cual nos puede dar luces de ventajas o desventajas al plantar el sitio analizado, sin embargo, es erróneo utilizar este tipo de muestreo para recomendar un plan de fertilización.

PASO FINAL DE TODO MUESTREO

Una vez obtenida la muestra debe rotularse de manera adecuada, es decir, que permita la individualización de la muestra para poder, una vez obtenidos los resultados, prescribir una recomendación para los sitios analizados específicamente. Este transporte debe realizarse, en el menor tiempo posible y sin alterar las características que se desean analizar, por ejemplo no someterlos a temperaturas elevadas en el transporte ya que esto podría dañar la muestra, para ello se recomienda transportar las muestras en hieleras o coolers que permitan mantener la muestra fresca.

En el manual correspondiente a esta unidad se abordarán al detalle las técnicas de muestreo más recomendadas para el estudio de suelos y biomasa aplicables.




*Algún día la ciencia
puede llegar a tener
la vida del hombre
en sus manos y,
haciendo estallar
el mundo la especie
humana puede
incurrir en un suicidio
colectivo.*

Henry Adams (1838-1918)

BIBLIOGRAFÍA

- Buduba, C. (2004). Muestreo de suelos. Criterios básicos. *Patagonia Forestal*, 1, 9-12.
- Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, R. M., Moreno, B., Piñango, L., & Villanueva, J. G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1).
- Orozco, L. (Ed.). (2002). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central (Vol. 50)*. CATIE.
- Rimski-Korsakov, H., & Álvarez, C. R. (2016). Muestreo de suelos. *Manejo de la fertilidad del suelo en planteos orgánicos*, 114.
- Roberts, T. L., & Henry, J. L. (2000). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones agronómicas del cono sur*. INPOFOS, 8, 7-10.
- Salgado, G. S., Palma, L. D. J., Lagunes, E. D. C., & Castelán, E. M. (2006). Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, ISPROTAB, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Segura-Castruita, M. A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C. A., & del Carmen Gutiérrez-Castorena, M. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21-28.
- Vélez, V. H. G., & Arango, G. J. L. (2001). Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. In *SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DEL LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES*. Valdivia.



*La ciencia que la
humanidad tiene en
un momento dado
depende de lo que es
la humanidad en ese
momento*

Georg Simmel (1858-1918)

PROTOSCOLOS PARA LA INVESTIGACIÓN EN RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

Esta unidad busca que el estudiante analice el flujo de agua en los árboles como un proceso dinámico a lo largo de una serie de compartimentos, desde la fuente (suelo) hasta el sumidero final (atmósfera). Proporciona un esquema de pensamiento útil y sorprendentemente real que facilita la comprensión del dinamismo del agua en la planta. Así, siguiendo esta propuesta, el flujo de agua a través del vegetal será directamente proporcional a la magnitud del gradiente de potencial entre los extremos e inversamente proporcional a la suma de resistencias que a lo largo del camino limitan el libre movimiento de la misma.

DESARROLLO DE CONTENIDO

La mayoría de las especies vegetales obtienen el agua del suelo. El agua se mueve a través del suelo, penetra al interior de las raíces y pasa a la parte aérea desde donde casi la totalidad pasa a la atmósfera por el proceso de transpiración. En su conjunto, el agua del suelo, planta y atmósfera constituye un continuo en el que ésta se desplaza de acuerdo a gradientes de energía. El proceso es de naturaleza física en el sentido de que no utiliza en forma directa la energía metabólica de la planta. El estado hídrico de las plantas, dentro de cierto límite, es el resultado del intercambio de agua entre dos fuentes principales, el agua del suelo y de la atmósfera. Si la planta pierde más agua a la atmósfera de la que absorbe, se produce un déficit hídrico.

En el caso de los árboles, las nuevas técnicas e instrumentos permiten un mayor entendimiento de los procesos fisiológicos. Sin embargo, a pesar de lo anteriormente

expuesto en cuanto al empleo de técnicas ecofisiológicas, hay que tener en cuenta algunas consideraciones básicas: (i) el funcionamiento de una planta, tanto si demuestra un excelente vigor como si presenta señales de decaimiento, es la manifestación de un complejo entramado de procesos que actúan combinadamente; (ii) no todos estos procesos son propiamente fisiológicos, estando en muchas ocasiones mediados por respuestas fenológicas, morfológicas o anatómicas; (iii) las variables fisiológicas que pueden obtenerse tras el estudio de una planta casi nunca integran esta complejidad, aportando tan sólo visiones parciales sobre procesos puntuales que afectan a la vida del vegetal; (iv) cada uno de los parámetros funcionales pueden ser a su vez objeto de diferentes interpretaciones, según el estado del vegetal o la escala de estudio. Es aconsejable, por lo anteriormente expuesto, que el estudio funcional de la planta se realice a partir de un esquema teórico previo, que, a modo de esqueleto, dé forma a los resultados derivados de las distintas medidas realizadas. Aunque la extrema complejidad del funcionamiento de un vegetal cuestione la posibilidad de desarrollar un modelo general, se han sugerido propuestas teóricas que al menos vertebran de una manera elegante aspectos concretos del mismo. Así, en lo relativo al movimiento de agua a través de la planta, es clásica la propuesta de interpretarlo como un proceso físico relativamente sencillo de modelizar. Este modelo es conocido como el continuo suelo- planta-atmósfera (ver figura 1)

PROTOCOLOS PARA LA INVESTIGACIÓN EN RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

Este tema es todo una línea de investigación que requiere de instrumentación más especializada para el trabajo en ecofisiología, son recientes las investigaciones que estén orientadas a brindar recomendaciones de manejo, siendo el campo de aplicación más próximo, la generación de información para decisiones en el mejoramiento genético,

y más particularmente en las especies implementadas en las plantaciones dendroenergéticas.

Esta unidad se basa en un manual muy completo sobre la relación suelo-agua-planta. Cada tema en el manual es desarrollado mediante una práctica con su debido procedimiento.

Claramente un uso intensivo del suelo podría requerir de mayor cantidad de agua para su producción, esto no es un parámetro importante cuando se tiene lluvias suficientes para que el suelo no presente déficit hídrico; sin embargo, en los casos contrarios es recomendado realizar estudios de consumo de agua, relaciones entre agua gastada y biomasa producida, por ejemplo. Pero se recomienda realizar estudios donde se exploren las eficiencias en el uso del agua relacionadas con la nutrición de la plantación, entre los elementos importantes a considerar estarían todos los relacionados con el control estomático, como es el caso del potasio, entre otros.

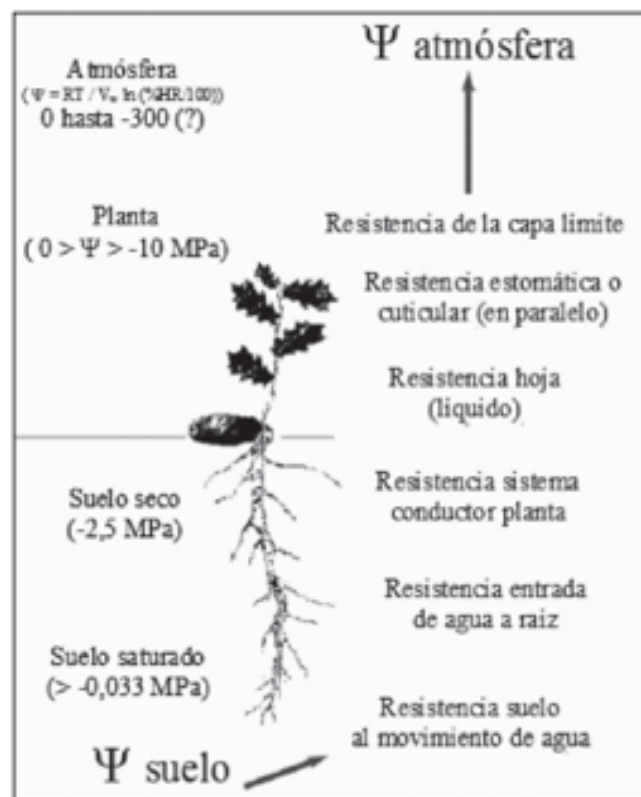


FIGURA 1. ILUSTRACIÓN DEL CONTINUO SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

A nivel de suelo se recomienda realizar estudios de conductividad hidráulica saturada de manera tal que se pueda concluir en caso de que cambie el nivel de agua de escorrentía, si es acaso que las plantaciones han cambiado el suelo y el agua está infiltrándose en lugar de escurriéndose. Cabe destacar que en el mundo se han comprobado cambios a nivel de suelo en terrenos cultivados por árboles por periodos de tiempo cercanos a los 20 años, en experiencias personales, los cambios en contenidos nutricionales en los primeros 20 cm de suelo pueden ser expresados en periodos de 4 años por lo que es importante crear siempre una línea base que permita una comparación a futuro del efecto de las plantaciones en el medio.

Claramente lo que se requiere es que estas plantaciones sean sustentables en el corto, mediano y largo plazo, por ello es importante evaluar todas aquellas relaciones existentes entre el suelos- agua- planta, de manera tal que se puedan responder preguntas futuras.

PROTOCOLO ESPECÍFICO PARA EL ESTUDIO DE LA RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

El presente protocolo es aplicable para plantaciones ya establecidas o bien para los nuevos ensayos que consideren los efectos especie, densidad y sitio. Las parcelas de muestreo o las parcelas bajo diseño experimental tendrán intervalos de mediciones cada 6 meses. Midiendo desde el inicio el diámetro de tocón a 0.1 m sobre el nivel del suelo, el diámetro a altura de pecho (DAP), el diámetro de copa (dos mediciones perpendiculares), la altura de copa viva y la altura total de todos los árboles útiles de cada unidad experimental. En plantaciones recién establecidas será el diámetro al cuello del árbol y la altura total. Se llevará registro del patrón arquitectural de los árboles y del Índice de Área Foliar (LAI)

con el medidor LICOR 2000. Se construirán curvas de respuesta fotosintética en función de diferentes tratamientos utilizando el medidor de fotosíntesis (puede ser CIRAS 3 o LICOR).

Cada año se extraerá una muestra destructiva de tres árboles de la zona de amortiguamiento de cada unidad experimental. Estos árboles serán cortados a 0.1 m sobre el nivel del suelo y se les determinará el peso húmedo, una muestra del mismo será transportada al laboratorio para ser procesados. De cada árbol se seleccionarán 5 ramas a las que se les cuantificará la cantidad de hojas, el peso seco de las mismas así como el área foliar mediante un escáner y el programa Digimizer 2012. Estas muestras de ramas y follaje así como una muestra de fuste serán secadas en forma separada a 65 °C hasta peso seco constante para molerlas y determinar de ellas contenidos nutricionales. Una muestra de peso húmedo conocido del follaje ramas y fuste serán secadas a 105 °C fuste para determinar la biomasa seca del árbol (± 0.1 g).

Se realizará análisis de la hojarasca mediante la ubicación de manera aleatoria de al menos 4 trampas de hojarasca de 0,25 m² en cada unidad experimental, la hojarasca será recolectada cada temporada de medición tomando una muestra compuesta por unidad experimental. Para la determinación de la biomasa las muestras serán secadas a 65 °C hasta peso constante (± 0.01 g).

Los análisis de químicos de estructuras vegetales y hojarasca serán realizados en el laboratorio de UNACIFOR. Número de muestras totales serán optimizadas en función de los recursos financieros disponibles.

MONITOREO DE LA DINÁMICA DE RAÍCES

La dinámica de las raíces finas será monitoreada cada dos meses en cada uno de los tratamientos. En medida de las posibilidades se instalarán cámaras de Rizotrones de fabricación casera para el monitoreo del crecimiento radical (utilizando la metodología de Loaiza, 2011). En medida de las posibilidades se realizará el análisis con ayuda del software WinRhizo Pro.

MEDICIÓN DE PH, CONTENIDO DE CARBONO, ANÁLISIS FÍSICOS Y DE NUTRIENTES EN SUELO

En cada una de las unidades experimentales en los meses en los que se realizará la medición de los árboles se tomará una muestra compuesta (8 puntos de muestreo) a las profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 cm. Una vez transportada las muestras al laboratorio serán secadas al aire por al menos 24 horas. Una vez seca al aire la muestra será tamizada a 2mm (mesh ATMS N°10) determinando los porcentajes de suelo, grava y biomasa en la muestra.

La determinación de materia orgánica en el suelo se realizará mediante el método de pérdida de peso por ignición WLOI (Weight-Loss-On-Ignition) (Magdoff 1996). Para ello, una alícuota de 10 g de suelo ($\pm 0,01$ g) se secará por 24 horas en horno a 105 °C para obtener el peso seco del suelo ($\pm 0,01$ g). Posteriormente, las muestras se calcinarán en una mufla a 450° C por 24 horas y pesarán (± 0.01 g) para obtener el peso calcinado. Previo al pesaje las muestras alcanzarán temperatura ambiente en un desecador. Se realizará un replica cada 10 muestras como medida de control del procedimiento. El contenido de materia orgánica (MO %) se determina utilizando la fórmula:

$$MO (\%) = \frac{PSS_{105^{\circ}C} - PSC_{450^{\circ}C}}{PSS_{105^{\circ}C}} * 100 \quad (1)$$

Donde:

PSS_{105°C}: peso seco del suelo (g)

PSC_{450°C}: peso calcinado del suelo (g)

Las determinaciones de carbono en suelo se escalarán utilizando el porcentaje de materia orgánica mediante la fórmula [2] acorde a Tabatabai (1996).

$$\text{Carbono (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{VS * Da * MO\%}{2} \quad (2)$$

Donde:

VS = Volumen de suelo (m³ ha⁻¹)

Da = Densidad aparente (Mg m⁻³)

MO = Materia orgánica (%).

La densidad aparente (Da) se determinará mediante muestreo por unidad experimental a profundidades de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm, tomándolas con un barreno para muestreo de Da con cilindros de 5 cm de diámetro. El volumen del cada cilindro será determinado (± 0.01 mm) así como también el peso seco del suelo (± 0.1 g) para así poder utilizar la fórmula:

$$Da = \frac{PSS_{105^{\circ}C}}{Vc} \quad (3)$$

Donde:

PSS₁₀ = peso seco del suelo (g)

Vc = Volumen del cilindro (cm₃)

La medición de pH al agua se realizará de acuerdo a la metodología de la CNA (Sadzawka et al., 2006)

Los análisis de químicos de suelo serán realizados en el laboratorio (el número de muestras totales serán optimizadas en función del presupuesto disponible). Los análisis físicos básicos deben considerar (textura, estructura, porosidad, difusión de oxígeno, capacidad de retención de humedad).

BALANCE HÍDRICO

Para determinar el balance hídrico de las plantaciones bajo estudio, se utilizarán una serie de datos basados en instrumentos meteorológicos y fisiológicos, mediciones de campo y mediciones puntuales a lo largo del periodo de estudio.

Por medio de una estación meteorológica portátil Campbell (sujeta a disponibilidad), se coleccionarán los principales datos meteorológicos (precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad de viento y temperatura del suelo). Con este set de datos se podrá determinar la precipitación total, mientras que las pérdidas por evaporación total y transpiración total se realizarán con el método Bowen-Ratio (Oladosu et al. 2007) y por medio de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al. 1998) calculando de esta forma la evaporación actual y potencial respectivamente. Para segregar la evaporación de la transpiración, se realizaran mediciones de flujo de savia (con los sensores de flujo de savia ICT) en una serie de árboles distribuidos seleccionados según su distribución diamétrica para representar de la mejor forma las plantaciones bajo estudio. Para ello, se utilizará el método de disipación térmica para determinar el volumen total de agua transportada por las plantas por unidad de tiempo. Esta medición empleará la utilización del área del xilema que transporta el agua. Para estimar el efecto que las copas de los árboles tienen sobre el balance hídrico, se estimará la interceptación de precipitación siguiendo los ensayos resumidos por Calvo-Alvarado et al. (2009).

Se realizarán adicionalmente, mediciones bi-mensuales del Índice de Área Foliar (LAI por sus siglas en inglés). Esta medición será acompañada por muestreos foliares para determinar variables morfológicas que pueden facilitar la interpretación de resultados. Algunas variables son: Área Foliar Específica (AFE) y porcentaje de cobertura de copas.

La infiltración se determinará por medio del monitoreo continuo de la humedad del suelo, en dos profundidades (40 cm y 100 cm). De esta forma se determinará el flujo de agua que se infiltra en el suelo y la que es retenida en el mismo. Adicionalmente, una serie de muestreos de suelos serán realizados para determinar las características físicas de los suelos en las plantaciones forestales e incluir estos parámetros dentro de los modelos a desarrollar.

El cálculo del balance hídrico de las plantaciones bajo estudio se realizará por medio de balances diarios al incorporar en los modelos, los valores diarios de la precipitación y las pérdidas por evaporación total, transpiración total y percolación. Las tasas de almacenaje respecto al tiempo será determinada por medio de las mediciones anuales de los parámetros mencionados.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUADO, E. 2001. Understanding Weather and Climate. Prentice Hill. New Cork.
- BOUWER H. 1999. Predicting infiltration and ground-water mounds for artificial recharge, Journal of Hidrologic Engineeering, October 1999, pp. 350-357.
- BUTLER, S. 1957. Engineering Hydrology. Prentice Hall Inc. EE.UU. 356 PÁGS.
- FASSBENDER, H.W.; E. BOERNEMIZA. 1987. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 5ta. Reimpresión. San José. 420 p.
- FETTER, C.W. 1988. Applied Hydrogeology. Prentice Hall. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. Albedo and reflectance anisotropy. 20p.
- GRASSI, C. 1976. Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 265 págs.
- JACKSON M.B., 1985. Ethylene and the responses of plants to soil water logging and submergence. Ann Rev Plant Physiol 36, 145-174.
- Jury, W.; Gardner, W. R.; Gardner, W. H. 1991. Soil Physics, Wiley. Fifth edition. California.
- KAWASE M., 1972. Effect of flooding on ethylene concentration in horticultural plants. J Am Soc Hort Sci 97, 584-588.
- LALLANA, V.; LALLANA M. 2001. Manual de Prácticas de Fisiología Vegetal. Universidad Nacional Entre Ríos (UNER), Argentina.10 p.
- Mollinado, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Mark, J. & Carles, L. (2005). Relación suelo árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. Agronomía costarricense. No29 (1), 67-76 p.
- RUIZ, R. 2006. Manejo del riego y suelo en el cultivo del palto. (Seminario). Chile. 20 p.
- SALISBURY, B. F.; ROSS, C. W. 1992. Fisiología Vegetal. Editorial Iberoamericana. México. 759 p.
- SÁNCHEZ, F. 2006. Evapotranspiración. Universidad de Salamanca (Geología). Salamanca. España. 8p.

- SCHOSINSKY, G.; LOSILLA, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual.- Rev. Geol. Amér. Central, 23: 43-55.
- SCHOSINSKY, G. 2007. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Costa Rica, Escuela Centroamericana de geología / Universidad de Costa Rica. 18 p.
- SCHOSINSKY, G.; LOSILLA, M. 2003. Notas del curso de hidrología con énfasis en balance hídrico: curso de capacitación. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 15 p.
- Takahashi, M., Hirai, K., Limong, P., Leungvutivirog, C., Suksawang, S., Panuthai, S, Anusontpornperm, S & Marod, D. (2009). Soil respiration in different ages of Teak plantations in Thailand. JARQ. No. 43(4), 337-343 p.
- VILLAFÁFILA, E.; WYSS, F. 2009. Riego en horticultura. Agencia Extensión Rural INTA. Argentina. 49 p
- WALTON, W, 1970. Ground water resource evaluation. Mc Graw Hill, New York. 664 págs.
- Zimmermann, B., Elsenbeer, H. & De Moraes, J.M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties implications for runoff generation. Forest Ecology and Management. 29-38p.

*Todos los educadores
son absolutamente
dogmáticos y autoritarios.*

*No puede existir la
educación libre, porque si
dejáis a un niño libre no
le educaréis.*

*Gilbert Keith Chesterton
(1874-1936)*



TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE USO DE LOS EQUIPOS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

Conocer el uso de las técnicas y equipos de laboratorio de suelos

DESARROLLO DE CONTENIDO

Esta unidad está diseñada para orientar en el uso de la instrumentación y equipamiento del laboratorio de suelos. Toda la información referente a los equipos deberá ser incorporada mediante un manual simplificado y en español que puedan elaborar los profesores con ayuda de los estudiantes

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Para el entendimiento de las principales técnicas de análisis se recomienda consultar la siguiente literatura:

Literatura recomendada:

- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. L., & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. Serie Actas INIA, (40), 140
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. D. L. L., Flores, H., & Neaman, A. (2004). Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile, 113.

Los análisis mostrados en el curso pueden ser consultados en los manuales citados previamente, sin embargo, se destacan dos puntos importantes. El primero es estos son equipos delicados y de altísima inversión por lo que no se debe escatimar recursos en el mantenimiento de los mismos, en los insumos requeridos y muy especialmente en el personal que lo opere, este personal no solo debe ser un analista químico o su homólogo en Honduras, sino también debe ser una persona con capacitación especializada en los equipos y preferiblemente en análisis de suelo. Los equipos de alto valor no deben ser operados por más de una persona.

Adicionalmente los procesos sucios del laboratorio como tamizado de muestras, secado de las mismas, deben hacerse en lugares que no contaminen ni los equipos ni las muestras.

En búsqueda de una certificación del laboratorio lo más recomendado es desarrollar los protocolos de análisis de manera tal que a la hora de certificarse se tenga experiencia en el análisis de muestras de suelos y en la determinación de cada elemento. Por otra parte, deben realizarse siempre repeticiones y réplicas entre las muestras a analizar de manera que se pueda anular cualquier error humano, de procedimiento o instrumental de manera tal que se le brinde la mayor credibilidad a los resultados entregados a un usuario.

Para evitar pérdidas de protocolos desarrollados en el laboratorio debe capacitarse al menos a 2 personas en cada uno de los análisis que se realicen.

Los análisis recomendados mínimos a realizar son: Textura, densidad aparente, análisis químico completo, determinación de la capacidad de retención de humedad, determinación del agua disponible en el suelo, análisis de conductividad hidráulica

saturada análisis de nutrientes a nivel foliar. Esto podría complementarse a nivel de investigaciones con determinaciones del flujo de sabia y análisis de área foliar.

USO DE LOS EQUIPOS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

Claramente en este punto y relacionado con lo mencionado anteriormente solamente estudiantes de postgrado y que cuenten con la capacitación requerida y que hayan mostrado habilidades de laboratorio podrán operar los equipos de laboratorio. Así mismo el equipo para toma de muestras en campo y todo lo relacionado con los muestreos de campo podrán y deberán ser desarrollados por los docentes como parte del curso, ello implica desde la estratificación de las propiedades a muestrear hasta el rotulado transporte y entrega de las muestreas en laboratorio.

Desde esta perspectiva todo alumno de pregrado deberá tomar muestras y conocer todos los procedimientos para ellos, por otra parte todo alumno de postgrado deberá analizar sus propias muestras y contribuir con el desarrollo de protocolos eficientes para operar el laboratorio y los equipos.

PREPARACIÓN DEL SUELO Y TÉCNICAS DE MECANIZACIÓN MANUAL

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

El adecuado establecimiento de una plantación, considera una serie de etapas o actividades orientadas a modificar el sitio hacia una mejor condición de suelo y mejoramiento de sus factores limitantes, de tal forma de concentrar los recursos disponibles para favorecer el crecimiento inicial, sobrevivencia y desarrollo posterior de la planta (limpia del terreno a plantar, la fertilidad del suelo, preparación del sitio, entre otros). En esta unidad el estudiante podrá profundizar en la importancia y en los elementos clave para recomendar las labores de preparación del suelo más convenientes para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas

DESARROLLO DE CONTENIDO

El desarrollo completo de esta unidad está acompañado con un manual descriptivo e ilustrado sobre el uso de maquinaria para las labores de preparación del suelo.

ESTABLECIMIENTO DE UNA PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA

El adecuado establecimiento de una plantación, considera una serie de etapas o actividades orientadas a modificar el sitio hacia una mejor condición de suelo y mejoramiento de sus factores limitantes, de tal forma de concentrar los recursos disponibles para favorecer el crecimiento inicial, sobrevivencia y desarrollo posterior de la planta (limpia del terreno a plantar, la fertilidad del suelo, preparación del sitio, entre otros).

HABILITACIÓN DE TERRENO

El objetivo de esta etapa es obtener un terreno limpio para que las plantas puedan establecerse y crecer adecuadamente, además de facilitar las labores de plantación. Sin embargo, se debe tener presente las regulaciones de corta de bosque nativo y vegetación en quebradas, por lo que se debe evitar la eliminación de ellas, especialmente cuando no afecten mayormente el desarrollo de la plantación.

¿QUÉ HACER PARA UNA ADECUADA HABILITACIÓN DE TERRENO?

Se pueden considerar dos faenas de importancia dentro de esta actividad: Roce y el ordenamiento de desechos en cordones o fajas.

Roce consiste en la actividad de limpieza que es necesario llevar a cabo cuando existe una cubierta vegetal arbórea, arbustiva o de malezas que puede afectar el futuro desarrollo de la plantación y/o que además, pudiera dificultar el trabajo de la plantación.

Existen dos tipos de roce, roce manual y roce mecanizado. El uso de uno u otro depende de la topografía del lugar y del costo asociado a cada uno de ellos.

Roce manual: El objetivo es la eliminación de la vegetación a través de la utilización de mano de obra. Se realiza mediante el uso de herramientas manuales, como el rozón, hacha o con máquinas menores como la desbrozadora y motosierra. Los rendimientos dependen principalmente del tipo y densidad de vegetación que se encuentre en el lugar, así como de las características topográficas del terreno. Principalmente se realiza en terrenos de pendientes fuertes o cuando la vegetación presente es poco densa y no implica problemas de competencia.

- El roce manual es aconsejable en terrenos de pendiente fuerte o cuando la vegetación es poco densa.
- Se debe evitar la eliminación de vegetación nativa, cuando constituya bosque o este protegiendo cursos de agua.
- Se recomienda no remover la hojarasca del piso ni el suelo mineral durante la labor de roce. No se debe remover vegetación de áreas de protección de cauces y quebradas.

Roce mecanizado: El objetivo es eliminar la vegetación a través del uso de maquinaria mayor. Existe una variedad de maquinarias que se utilizan para estos fines, dentro de la cual podemos destacar:

- Excavadora con oruga, que realiza un trabajo de remoción de la vegetación con el tridente, y puede a la vez ordenar los desechos en fajas.
- Tractor picador, también conocido como mulcher. Esta es una máquina trituradora que permite la fragmentación de todo el material existente y, que tiene la ventaja de optimizar el manejo de desechos, ya que deja estos prácticamente incorporados al suelo.
- Bulldozer, al igual que la excavadora realiza un trabajo de remoción de la vegetación, a través del impacto. Estas máquinas tienen como restricciones la pendiente del terreno y la fragilidad del suelo.

En el caso de bulldozer y mulcher trabajan con una pendiente máxima de 25 a 30 %, y la excavadora hasta un 50%, para que no existan riesgos en su operación.

TRATAMIENTO DE DESECHOS

El objetivo es ordenar y/o eliminar los desechos que se originan en la preparación inicial del terreno de tal forma de despejar el espacio que ocuparán los árboles y facilitar las posteriores actividades silvícolas. Existen tres alternativas para el tratamiento de desechos: quema, ordenamiento y el picado o triturado del desecho con o sin incorporación al suelo.

Quema de desechos: consiste en la utilización del fuego para eliminar los desechos. Es una alternativa comúnmente usada, dado que permite la eliminación rápida y efectiva del material leñoso del lugar a plantar; además, produce un eficiente control de la competencia y la liberación de nutrientes que serán ocupados por las plantas en su crecimiento inicial. Sin embargo, no siempre es aconsejable debido al elevado riesgo de incendios, la pérdida de microorganismos y nutrientes del suelo, y pérdida de productividad en el mediano plazo, lo cual es crítico cuando las rotaciones son cortas. En el caso de decidir realizar una quema controlada, se debe dar aviso a la entidad competente, quien autorizará la fecha y hora que pueden efectuar esta quema.

Ordenamiento del desecho: es una técnica altamente recomendada y consiste en el ordenamiento del material disperso producto del roce; se puede realizar en fajas paralelas a la curva de nivel o en cordones de distribución regular, para permitir posteriormente un adecuado establecimiento de la plantación. Este ordenamiento puede realizarse en forma manual o mecanizada, y su espaciado dependerá de la densidad de plantación, como del rendimiento esperado. Esta alternativa permite una mejor protección del suelo, minimizando efectos erosivos y la pérdida de nutrientes.

- Ordenamiento manual requiere de mano de obra que toma el desecho y lo apila en fajas. Preferentemente este tipo de ordenamiento se realiza en terrenos con pendientes fuertes (30 - 35%) y siguiendo las curvas de nivel, o en el caso de existir una cantidad tal que no es necesario el uso de maquinarias.

- Ordenamiento mecanizado requiere de maquinaria que apila el desecho; esta labor puede hacerse en forma simultánea al roce, como es el caso de la excavadora, que va apilando en fajas el desecho que va extrayendo. Es recomendable que las pilas de desechos no tengan una altura superior a 1,5 m para no interceptar la luz que debiera recibir la plantación, y apilarlo en curvas de nivel para evitar procesos erosivos.

Picado del desecho: puede hacerse a través del tractor picador; éste realiza el roce y picado de desechos en forma simultánea con un rodillo que posee en la parte delantera. Es posible incorporar un elemento extra en la parte trasera del tractor picador que vaya incorporando el desecho al suelo. El ordenamiento y el picado de desechos tienen la ventaja respecto a la quema, de dejar los nutrientes presentes en el sitio, para que se incorporen gradualmente a través de descomposición al suelo y de esta manera asegurar un nivel de productividad del sitio en el mediano plazo, y mantener la humedad por más tiempo. Este tratamiento, junto con el ordenamiento del desecho, proporciona una mejor protección al suelo, al no extraer o eliminar la materia orgánica existente.

Siempre tomar en cuenta lo siguiente:

- En el caso de utilizar la quema como técnica de eliminación de desechos esta debe ser de intensidad media y mínima duración, sin olvidar la construcción de cortafuegos en los bordes del terreno a quemar y mantener una vigilancia hasta que el fuego se haya extinguido completamente.
- Las quemas controladas deben estar autorizadas previamente por la entidad competente.
- Es conveniente emplear técnicas alternativas a la quema de desechos, especialmente en sitios de fuertes pendientes y de alto nivel de fragilidad.

- En terrenos con pendiente es aconsejable ordenar los desechos en fajas siguiendo las curvas de nivel.
- El ordenamiento y picado de desechos permiten proteger el suelo y minimizar la erosión.
- Se recomienda favorecer el depósito de desechos en cárcavas cuando éstas existan.
- Es aconsejable mantener la vegetación nativa, especialmente cuando no afecta mayormente la plantación.
- Se debe procurar mantener la vegetación en áreas de protección de cauces y quebradas para evitar procesos erosivos de mayor efecto.

PREPARACIÓN DEL SUELO

El objetivo de esta actividad es dejar el suelo en condiciones tales que permita una mayor retención de agua, que las raíces puedan extenderse y desarrollarse con facilidad, y promover el desarrollo de un mejor sostén de la planta y permitir un mayor aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el perfil. Favorece a su vez, la penetración del agua y el aire a mayor profundidad, además de un mejor control de malezas, arbustos y otros. Es preferible que esta actividad se realice en períodos secos y cuando exista un bajo contenido de humedad en el suelo, lo que permite prevenir procesos como compactación y remoción excesiva. Es recomendable que, la preparación se efectúe en curvas de nivel, con el objeto de proporcionar un mejor aprovechamiento del agua por la planta al interceptar su paso y quedar más tiempo retenida en la línea de preparación.

Preparación mecanizada

Se realiza una remoción del suelo con la ayuda de maquinaria pesada, la que presenta, sin embargo, ciertas limitantes en su uso como la pendiente del terreno, la vegetación presente y los obstáculos naturales del terreno.

En terrenos con topografía moderadamente plana (hasta 30 % de pendiente), se puede realizar subsolado con tractor oruga, bulldozer o tractor agrícola de doble tracción sobre la línea de plantación, alcanzando una profundidad ideal de 70 cm y no inferior a 40 cm. Este tratamiento debe realizarse antes del período de lluvias, ya que el efecto de remoción de suelo sería mínimo e incluso perjudicial para las raíces si se efectúa en época de lluvias.

Es importante además, romper adecuadamente los terrones, donde los pastos presentes, como los mejorados, no lo permiten. En el caso de carecer de subsolador, también es posible el uso de un arado de disco, que se puede usar con tractor agrícola de doble tracción. Esta técnica consiste en un subsolado menos profundo, solo hasta 30 ó 45 cm. En general el rutter es acompañado por dos pares de rastras paralelas que fabrican la cama de plantación. Este trabajo se efectúa luego que el suelo se ha mojado con las primeras lluvias y es recomendable hacer dos pasadas de tractor agrícola por surco.

Probablemente el mejor tratamiento es la combinación del subsolado y el surcado formando un camellón en curvas de nivel, lo cual favorece la remoción de suelo; además aumenta la eficiencia en la captación y conservación de la humedad del suelo y la disminución de vegetación competidora.

Preparación con animales

El cultivo con apoyo de animales, consiste en el uso de arado tirado por caballos, bueyes o burros, para la confección de surcos en curvas de nivel. Este tiene el inconveniente de la profundidad del surco, que usualmente no alcanza más allá de 30 cm, pero es una buena alternativa para controlar los procesos erosivos, dado que ayuda a detener el agua de lluvia que corre por las pendientes, evitando así que tome velocidad y pueda provocar pérdida de suelo.

Preparación manual

Consiste en utilizar mano de obra y herramientas manuales. En este caso, se realiza la confección de los hoyos de plantación en forma manual, realizando un cultivo con pala plantadora removiendo las primeras capas de suelo y soltando los terrenos.

Siempre tomar en cuenta lo siguiente:

- El subsolado puede efectuarse de 40 a 70 cm de profundidad o arado total de la superficie, subsolado profundo (60 - 80 cm) o escarificado con tractor (40 - 50 cm de profundidad, con tres subsoladores separados a 50 cm).
- Cuando la plantación se establece en terrenos con pendiente, es importante realizar la preparación de suelo siguiendo las curvas de nivel, para favorecer la captación de aguas lluvias, optimizar el uso del agua y disminuir los procesos erosivos provocados por la escorrentía.
- Para asegurar una adecuada preparación del suelo en la técnica con animales, se recomienda realizar un mínimo de dos pasadas por la línea de plantación.

- Es recomendable que la preparación de suelo se efectúe en condiciones de suelo seco, independiente de la maquinaria utilizada. Si las condiciones del terreno lo permiten, es recomendable utilizar subsolado como técnica para preparación de suelo.
- Cuando las condiciones de sitio, como mucha pedregosidad o demasiada pendiente, impidan el surcado o arado en curvas de nivel, se puede incidir en una buena preparación del hoyo de plantación.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVARADO, A.: Maquinaria y mecanización agrícola, 570pp., Ed. Universidad Estatal a Distancia (EUNED), ISBN 9968-31-332-7, San José, Costa Rica, 2004.
- Arguedas-Gamboa, M. Arias-Aguilar, D, Briceño-Elizondo, E., Canessa-Mora, R., Chavarría-Vidal, A. E., Esquivel, E., & Guevara-Bonilla, M. (2016). Mejoramiento tecnológico de suelos para el incremento de la productividad en plantaciones de *Tectona grandis*. Recuperado en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6841>.
- Benito, E., Soto, B., Díaz Fieros, F. (1991). Soil erosion studies in NW Spain. En: Sala, M.; Rubio, J. L.; García-Ruiz, J. M. Soil Erosión Studies in Spain, Geoderma Ediciones. Logroño.
- BETANCOURT, Y.; M. RODRÍGUEZ; C. IGLESIAS; A. GUTIÉRREZ: "Calidad de la labor de nuevas alternativas de preparación de suelos arcillosos pesados con superficies acanteradas y cobertura de residuos vegetales en caña de azúcar", Revista Ingeniería Agrícola, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 4(1): 8-13, 2014b.
- BETANCOURT, Y.; M. RODRÍGUEZ; C. IGLESIAS; J. R. GÓMEZ; I. GARCÍA; E. BECERRA: "Calidad de la labor de tres aperos de labranza primaria en suelos arcillosos pesados con superficies acanteradas y cobertura de residuos vegetales", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(1): 5-10, 2014a.
- FAO.: Manual de sistemas de labranza para América Latina, pp. 193-195, Boletín de suelos de la FAO, ISBN: 92-5-302869, Roma, Italia. 1992.
- Gavande, S. A. S. A. (1991). Física de suelos: principios y aplicaciones. Limusa,.
- Lal, R. (1997) Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating - greenhouse effect by CO₂- enrichment. Soil and Tillage Research, 43, 81-107.
- Merino, A., Rey, C., Brañas, J., Rodríguez-Soalleiro, R. (2003). Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don de Galicia. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12, 85-89.
- Valverde, J. C., Guevara-Bonilla, M., Arias, D., Briceño, E., & Esquivel, E. (2017). Efectos de las actividades de labranza en el índice de área foliar en una plantación de *Tectona grandis* en la zona norte de Costa Rica. Madera y Bosques, 23(2), 7-19.

MONITOREO DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y EN LA BIOMASA Y MANUAL SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ESPECIES DENDROENERGÉTICA

OBJETIVO DE ESTA UNIDAD

Las plantaciones dendroenergéticas de alta densidad y corta rotación son más sensibles al mantenimiento de la sustentabilidad dada la mayor extracción de nutrientes vía cosechas sucesivas al compararlas con plantaciones forestales tradicionales, especialmente en suelos marginales. En esta unidad se profundizará en las técnicas de evaluación de la biomasa y los nutrientes considerando el uso de modelos alométricos y técnicas para monitorear el estado nutricional y cuantificación de carbono en el sistema productivo

DESARROLLO DE CONTENIDO

El desarrollo completo de esta unidad está acompañado con un manual detallado sobre los conceptos básicos de biometría forestal para el estudio de biomasa a través de las diferentes técnica de modelación matemática.

PROTOCOLO PARA ESTUDIO DE LA BIOMASA Y RESERVAS DE CARBONO

La cuantificación de la biomasa vegetal es clave para conocer el carbono almacenado por los ecosistemas forestales y, por ende, la capacidad de mitigación del cambio climático. Existen variedad de métodos para estimar la biomasa, muchos de ellos con pequeñas variaciones, por ejemplo, el tamaño y forma de las unidades de muestreo, la inclusión o no de algún componente del reservorio (hojas, ramas, raíces, necromasa), diámetro mínimo inventariado, entre otras. El objetivo del manuscrito es explicar los aspectos más importantes a considerar en el inventario de remociones, a partir del diseño de inventario (diseño estadístico, tamaño y forma de las unidades de muestreo, componentes de la biomasa a evaluar). En un segundo punto se trata el tema de la determinación de la biomasa aérea y de raíces, haciendo referencia al método directo o destructivo y a los métodos indirectos, en especial al uso de modelos matemáticos por su fácil aplicación y bajo costo; además se anotan algunos modelos para bosque natural y plantaciones. También se hace referencia al estudio de carbono en suelos, a los factores de expansión de biomasa y a cómo determinar el carbono en la biomasa. Se espera que estas notas faciliten la comprensión del tema y que sean de referencia para el establecimiento de esquemas de monitoreo, reporte y verificación.

MONITOREO DE LA BIOMASA

El carbono en los ecosistemas se encuentra en cuatro componentes o compartimentos: biomasa sobre el suelo, necromasa (leñosa y hojarasca), sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo.

El diseño de muestreo, la intensidad o tamaño la muestra, y el tamaño de las parcelas está en función de los objetivos, de la precisión requerida y de los recursos disponibles, además de la cantidad carbono almacenado. Para definir el tamaño de la parcela también debe considerarse la densidad arbórea. Al respecto, MacDicken (1997) da algunas recomendaciones (cuadro 2).

En otros trabajos de investigación se han utilizado tamaños de parcela muy variados, que van

CUADRO 2. TAMAÑO DE PARCELAS PARA INVENTARIOS DE CARBONO SEGÚN MacDicken (1997)

Área por árbol (m ²)	Tamaño de la parcela (m ²)	Aplicación
0 – 15	100	Vegetación muy densa, rodales con gran número de tallos de diámetros pequeños, distribución uniforme de tallos grandes.
15 – 40	250	Vegetación leñosa moderadamente densa.
40 – 70	500	Vegetación leñosa moderadamente esparcida.
70 – 100	666.7	Vegetación leñosa esparcida.
> 100	1 000	Vegetación leñosa muy esparcida.

desde 100 a 1,225 m² en bosque natural para biomasa leñosa y de 64 a 625 m² en plantaciones forestales tradicionales. En el caso de las plantaciones dendroenergéticas, dependiendo de la densidad, las parcelas de muestreo deben considerar tamaños que representen una muestra de al menos 50 individuos.

El componente herbáceo compuesto principalmente por el pasto, hierbas y arbustos (diámetro a la altura del pecho [dap] menor a 2.5 cm) es cuantificado en parcelas de 50 x 50 cm o de 1 x 1 m. La hojarasca y mantillo compuesta por los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos, semillas) en la superficie de suelo se evalúa en parcelas de 0.25 m².

La frecuencia de las evaluaciones es diferente según el componente de carbono. En los componentes que presentan cambios relativos rápidos en la concentración de carbono, el monitoreo debe hacerse más seguido. En los compartimentos con cambios menores como el suelo y en áreas no disturbadas el carbono no cambia dramáticamente de año en año, por lo cual el monitoreo puede hacerse más distante, además el muestreo de suelos es costoso. Para eliminar el efecto de la estacionalidad como una fuente de variación de los resultados, los inventarios en las parcelas permanentes deben realizarse en la misma época del año, preferiblemente en el mismo mes (MacDicken, 1997). Las parcelas permanentes de muestreo para evaluar los cambios temporales de biomasa son consideradas como un medio estadísticamente superior.

CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA

La biomasa es el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal. Para determinar y monitorear el almacenamiento de carbono orgánico en sistemas forestales y agroforestales, se debe estimar la diferencia de carbono almacenado en suelos y en la biomasa para sitios con el proyecto y sin este sobre un período de tiempo específico; la diferencia en la cantidad de carbono almacenado es el carbono secuestrado por el proyecto. Existen dos técnicas de monitoreo que pueden ser usadas para evaluar el carbono fijado en proyectos forestales y recomendadas por el IPCC (1996):

Modelaje o método indirecto:

Se calcula la biomasa del árbol con ecuaciones o modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, tales como el diámetro a la altura del pecho (dap), la altura comercial (hc) y total (ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera. También puede estimarse la biomasa a partir del volumen del fuste, y usar luego la densidad básica de la madera para calcular el peso seco y un factor de expansión para calcular el peso total del árbol.

Método directo o mediciones en campo:

Consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa, luego se determina el peso seco.

BIOMASA SOBRE EL SUELO

La biomasa viva sobre el suelo está compuesta por los componentes leñosos (árboles en pie) y el sotobosque: pastos, hierbas y estados juveniles, hojarasca o mantillo y la necromasa. Sin embargo, la mayoría de estudios se basan en estimaciones de biomasa de los componentes leñosos, además, no toman en cuenta la densidad de la madera, que varía con la edad y la productividad del sitio, lo cual puede generar errores. Según Brown et al. (1989), las estimaciones de biomasa aérea requieren de un muestreo destructivo o del uso de métodos indirectos, el segundo caso es el más práctico y menos costoso. Para otros autores, el uso de ecuaciones alométricas permite una estimación más confiable y directa de la biomasa, ya que en la misma ecuación se contempla la variabilidad presentada por los árboles por edad y competencia, y su crecimiento refleja la productividad del sitio.

BIOMASA DE LOS COMPONENTES LEÑOSOS

Se usan diferentes métodos para estimar la biomasa a partir de mediciones simples:

- Aplicación de una ecuación o modelos de regresión específica (ecuaciones alométricas) (cuadro 3) o tablas específicas de biomasa para cada especie a partir de mediciones de árboles individuales (diámetro a la altura del pecho (dap) y altura principalmente), información fácil de obtener y de bajo costo. Los modelos relacionan la biomasa con variables de árboles en pie (dap, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.). Estos modelos pueden ser construidos usando un mínimo de 30 árboles bien seleccionados (MacDicken, 1997). Se prefiere el uso de modelos que transforman valores de volumen de madera de fuste en biomasa, debido a que la densidad de la madera varía entre árboles de una especie. En forma general se prefieren los modelos que tienen como variable regresora el diámetro, porque es muy simple de medir y se obtiene en la mayoría de estudios donde se colecta información para el manejo de plantaciones o bosque natural, esto es una ventaja adicional ya que permite estimar la biomasa a partir de una sola variable. Algunos modelos se presentan en el cuadro 2.
- Aplicación de una ecuación de regresión genérica al diámetro o a otras medidas de los árboles (cuadro 2). Existen modelos generales para estimar el contenido de biomasa aérea en inventarios forestales (Brown et al., 1989, Schroeder et al., 1997), su uso se justifica cuando no existen modelos específicos para zonas o condiciones particulares o cuando varias especies presentan un patrón morfológico de crecimiento similar.
- Calcular el volumen del fuste (con ecuaciones de volumen, con tablas de rendimiento, etc.) y multiplicarlo por la gravedad específica para pasar a biomasa, posteriormente se aplica un factor de expansión para estimar biomasa entera del árbol. El valor de gravedad específica de cada especie puede encontrarse en la bibliografía o calculado por análisis de laboratorio.
- Uso de la técnica del árbol promedio (MacDicken, 1997). Se parte del supuesto de que el árbol de tamaño promedio tiene una cantidad promedio de biomasa, se considera que el área basal tiende a ser un buen predictor de la biomasa total. Su uso requiere del muestreo destructivo para determinar la biomasa y el peso del árbol es multiplicado por el número de árboles del rodal para obtener un estimado de la biomasa total. Una posibilidad es utilizar el árbol correspondiente al diámetro medio cuadrático (D_g) (árbol de área basal media).

Los primeros tres métodos se denominan indirectos y el cuarto directo.

CUADRO 3. MODELOS ESPECÍFICOS PARA ESTIMAR BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES. EL SIGNIFICADO DE LOS ACRÓNIMOS Y SUS UNIDADES ESTÁN EN LOS ARTÍCULOS ORIGINALES.

Autor	Biomasa	Ecuación	R ²
Sanquetta, Farinha & Eduardo (2008)	<i>Pinus taeda</i>	PVF = $-0,3074 + D^{(2,1289)}$	0,89
		PVR= $162,0559 - 9,2412 * D + 0,2393 * D^2$	0,43
Fonseca & Rojas (2015)	<i>Dendrocalamus latiflorus</i> , <i>Guadua agustifolia</i> y <i>G. aculeata</i>	Bculmos = $13,8618 + 1,85367 * G$	0,8
		Btotal = $29,2136 + 1,78608 * G$	0,76
Fonseca, Ruíz, Rojas y Alice (2013)	<i>Alnus acuminata</i>	Bárbol= $\exp (-2,62104 + 2,51636 * \text{Ln} (\text{dap}))$	0,98
		Ca= $\exp (-0,145192 + 1,28892 + \text{Ln} (G))$	0,99
Fonseca et al. (2009)	<i>Vochysia guatemalensis</i>	Bt = $\exp (-1,44742 + 1,3308 * d ^{0,5})$	0,98
	<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Bt = $\exp (-2,12607 + 1,69594 * d ^{0,5})$	0,98
Montero & Kanninen (2002)	<i>Terminalia amazonia</i>	BAT= $\exp (-1,648 + 2,392 * \text{ln} (\text{dap}))$	0,99
		B fuste = $\exp (-1,602 + 2,99 * \text{ln} (\text{dap}))$	0,99
Pérez & Kanninen (2003)	<i>Tectona grandis</i>	Bt= $-0,815 + 2,382 * \log_{10} \text{dap}$	0,98

MUESTRO DE COMPONENTES LEÑOSOS, HERBÁCEOS Y DE NECROMASA: PROCEDIMIENTO DE CAMPO Y LABORATORIO PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

La determinación de la biomasa por métodos indirectos requiere de la medición de variables como el diámetro (dap) y altura total de toda la vegetación leñosa, según el diámetro mínimo fijado para el inventario. El método directo o destructivo requiere el muestreo de árboles preferiblemente de área basal media (árbol de diámetro cuadrático medio-Dg), ya que es una variable de fácil estimación y presenta una alta correlación con el árbol de volumen medio del rodal. Después de cortado el árbol se separan las diversas partes (fuste, ramas vivas, ramas muertas, hojas- acículas, raíz), cada componente se pesa en el campo. En el caso de que parte del fuste y las ramas gruesas sean usadas para obtener productos en procesos de aserrío, se obtiene su volumen y la biomasa seca se calcula extrayendo discos o muestras de madera, o bien se usa la densidad específica.

El componente herbáceo compuesto principalmente por el pasto, hierbas y arbustos (dap menor a 2.5 cm), disponible en la unidad de muestreo se corta a nivel del suelo, además se

cosecha la necromasa fina (hojas, ramas, frutos, semillas) y gruesa (material leñoso con diámetro > 2 cm)

Según MacDicken (1997), la biomasa de raíces representa entre un 10 y 40 % de la biomasa total. La biomasa de raíces puede estimarse por dos procedimientos: medición directa y uso de relaciones (modelos) de biomasa de raíces obtenidas en la bibliografía. Con el primer método se invierte mucho tiempo y con un nivel de precisión moderado, debido a la amplia variabilidad en distribución de las raíces en el suelo. El uso de modelos o relaciones de biomasa de raíces puede ser de utilidad usando una relación de biomasa de raíces - biomasa aérea. En bosques tropicales la relación biomasa de raíces: biomasa aérea varía de 0.03 a 0.49, aunque para ofrecer resultados conservativos se podría emplear un valor de 0.10 a 0.15 (MacDicken, 1997). En otros estudios, las raíces han representado el 10% de la biomasa aérea en sitios húmedos y cerca del 30% en lugares semiáridos (Dixon, 1995). Aunque la recomendación de MacDicken (1997) es compartida y se reconoce el grado de dificultad y alto costo que la cuantificación de raíces conlleva, es oportuno realizar estudios locales que permitan una evaluación más precisa, ya que la diferencia entre utilizar valores generales y cifras de trabajos locales es bastante marcada.

Las raíces se clasifican por su diámetro en: muy finas (<0.5 mm), finas (0.5-2.0 mm), pequeñas (2.0-5.0 mm), medias (5.0-10 mm), gruesas (10-20 mm), y muy gruesas (>20 mm). Según MacDicken (1997), en la mayoría de los protocolos de monitoreo de fijación de carbono se consideran las raíces finas como las de diámetro menor a 2.0 mm y son las más estudiadas por su dinámica. La cuantificación de la biomasa de raíces finas tiene el inconveniente de su corta vida, mueren rápidamente y el carbono almacenado en ellas se libera rápidamente, y como tal, no es un carbono duradero que es lo que interesa a los mercados de este servicio ambiental. La raíz gruesa o de anclaje

por ser leñosa representa un carbono más duradero y una cantidad muy significativa por área, sin embargo, la dificultad y alto costo que representa su cuantificación han hecho que pocas investigaciones se interesen por desarrollar métricas para este componente.

Diversos estudios se han desarrollado utilizando la clasificación de raíces antes citada o con pequeñas modificaciones. Una vez separadas las raíces se secan a 72 °C durante 48 horas y se pesan para determinar el contenido de humedad. Para el muestreo de raíces se utiliza un barreno de acero con el cual se obtienen las muestras de suelo a diferentes profundidades en el perfil del suelo. En ecosistemas tropicales generalmente se trabaja hasta 40 cm que es donde existe la mayor dinámica. Como referencia se tienen valores de 99.2 t/ha y 93.6 t/ha en bosques primarios y secundarios, respectivamente, a 30 cm de profundidad. Cuando se colecta la muestra de biomasa viva o la necromasa debe tenerse el cuidado de no contaminarla con suelo (principalmente con la necromasa fina), ya que las fracciones de carbono en biomasa y en suelo son muy diferentes. Toda la biomasa viva o muerta se pesa en el campo y se toma una muestra de aproximadamente 500 g y se lleva al laboratorio para determinar el contenido de materia seca a 60 - 75 °C durante 72 horas. Esta muestra se tritura a 250 micras y en una submuestra se determina la proporción de carbono.

ESTIMACIÓN DE LA

CANTIDAD DE CARBONO EN LA BIOMASA

Para estimar el carbono almacenado por el ecosistema o por parte de él, es necesario estimar la biomasa utilizando cualquiera de los métodos descritos anteriormente, el carbono almacenado puede estimarse de diferentes formas:

- Mediante el procedimiento de combustión seca, a partir la biomasa seca
- Usando el método de Walker y Black (Bremner y Mulvaney, 1982).
- Utilizando la fracción de carbono a partir de biomasa seca. Varios autores recomiendan utilizar para diversos tipos de bosques naturales, bosques secundarios y plantaciones forestales, ente 0.45 y 0.5 como fracción de carbono en caso de no existir datos disponibles.

El carbono edáfico puede ser determinado usando muestras compuestas que representan múltiples parcelas, con lo cual se reducen los costos y se obtienen estimaciones razonables (MacDicken, 1997). La acumulación en el suelo se determina por medio de la densidad aparente, generalmente a una profundidad de 30 cm (en algunos estudios se ha trabajado hasta 105 cm en tramos de 15 cm), ya que el cambio de uso del suelo tiene el mayor efecto en las capas superiores (IPCC, 1996). El muestreo se realiza con un barrero cilíndrico para extraer muestras de suelo para el análisis de carbono, estimar la biomasa radical y calcular la densidad aparente.

Este reservorio puede verse afectado por las actividades de manejo del suelo y no se considera oportuna la evaluación del carbono edáfico por su dificultad y altos costos. Es usual que este reservorio sea excluido de la mayoría de estudios que intentan estimar las emisiones producto del manejo forestal de bosques. La exclusión se justifica debido

a que se impacta un área relativamente pequeña, el impacto tiene una duración corta y que además siempre se mantiene cobertura vegetal en el sitio; adicionalmente, los cambios en este compartimento ocurren a tasas sumamente lentas, lo que dificulta su determinación, además de que son afectados por el uso anterior del suelo.

BIOMASA AÉREA Y ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS

SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Se inicia con la selección de un número amplio de sitios donde se dispone de plantaciones de la especie topografía desde plana y suelos fértiles a moderadamente fértiles. En cada plantación se instala una parcela cuyas dimensiones dependen de la densidad de plantación (500 m² para la identificación de los árboles dominantes entre los más gruesos y más altos en una plantación normal a 3.0 x 3.0 m). Durante el período vegetativo se corta un número de árboles dominantes cubriendo todo el rango edad. Cada árbol es seccionado en cinco componentes: tronco, corteza, ramas primarias, ramas secundarias y hojas. En todas las edades se cortan al menos 5 árboles por parcela.

Sobre el suelo limpio de hojas verdes caídas, se coloca una lona sobre la cual se dirige la caída del mismo y en lonas separadas y extendidas sobre el suelo se recoge la biomasa de cada uno de los componentes del árbol. Las ramas primarias son aquellas que salen del tronco y las secundarias las que salen de una rama primaria. El tronco es partido en secciones consecutivas de un metro y se procede a quitarle la corteza.

La corteza se parte longitudinalmente con una herramienta manual y se desprende del tronco con una herramienta en forma de espátula. Se pesa por separado cada uno de los componentes del árbol utilizando una balanza digital de campo. Se procede a recoger las muestras de cada componente para determinar en el laboratorio la concentración de cada nutrimento y el contenido de humedad. El peso húmedo de la muestra de fuste, ramas primarias y hojas se determina en el campo con una balanza digital. La muestra de hojas de cada árbol se reparte de 4 grupos de 10 hojas al azar (40 en total por árbol). La muestra de ramas secundarias se conforma con unos 20 trozos pequeños tomados al azar del total y se envía al laboratorio, donde serán molidos con un triturador con cuchillas. El peso húmedo de la muestra de ramas secundarias se determina una vez triturada la muestra. Para la toma de la muestra de madera del fuste se parten las secciones del tronco en segmentos de 25 cm con la ayuda de una motosierra limpia en muy buen estado de funcionamiento y se recoge un kg de aserrín sobre una lona limpia. La muestra de corteza y ramas primarias se obtiene cortando con motosierra todas las secciones y recogiendo luego cerca de un kg de aserrín previamente homogeneizado para cada caso y colocado en bolsas plásticas con cierre hermético. Antes de recoger el aserrín se debe asegurar de eliminar la contaminación con basuras o cualquier pedazo de material sin cortar.

Análisis de laboratorio. En el campo, las muestras se almacenan en bolsas plásticas selladas e identificadas, se guardan en hieleras para evitar el deterioro y se envían al laboratorio de análisis. El análisis de las muestras de tejidos se puede realizar utilizando la metodología de digestión húmeda con ácido nítrico, en el extracto se determina el Ca, Mg, K, Zn, Cu, Mn y Fe por emisión atómica con plasma, el P por el método colorimétrico de Murphy y Riley) y el N por el método Mikrokjeldahl descritos por Henríquez, Bertsch y Salas (1995). La determinación de la biomasa seca de cada árbol se hace con base en el contenido de humedad de cada muestra y el peso húmedo de cada componente.



BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA PARA LEER

- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2017. Uso de 3PG como herramienta para modelar plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus camaldulensis* en la región de Biobío, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 14 (35), 33-44. DOI: 10.18845/rfmk.v14i35.3151
- Esquivel E., Guevara M., Briceño E. 2017. Effects on Soil of Forest Plantations of High Density and Short Rotation. 1st World Conference on Soil and Water Conservation (CONSOWA), Lleida, España. DOI: 10.13140/RG.2.2.26878.59209
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2017. Potasio y Boro en plantaciones dendroenergéticas, en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 14 (34), 27-36. DOI: 10.18845/rfmk.v14i34.2998
- Esquivel E., Guevara M., Briceño E., 2016. Dendroenergía, resultados promisorios, una realidad en Costa Rica. XIV Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.2.34602.62409
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2016. Sustentabilidad en el uso de nutrientes de plantaciones dendroenergéticas en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 13 (33), 11-19. DOI: 10.18845/rfmk.v13i33.2573
- Esquivel E., Rubilar R., Cancino J. 2016. Efecto inicial de los residuos de aprovechamiento forestal en el carbono de un suelo granítico de Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 13 (30), 22-32. DOI: 10.18845/rfmk.v13i30.2457
- Sandoval S., Cancino J., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M. 2015. Evaluación del daño causado por *Ectinogonia buqueti* (Coleoptera: Buprestidae) en plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus camaldulensis*. *Bosque (Valdivia)*, vol.36, no.2, p.247-254. ISSN 0717-9200. DOI: 10.4067/S0717-92002015000200010

- Esquivel E., Arias D., Briceño E., Guevara M., Chavarría A., Camacho D., Moreira I., Arnáez E., Canessa R. 2015. Experiencias y resultados en el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas en Costa Rica. III Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación distribuida de Renovables. Liberia, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.4666.4722
- Guevara-Bonilla M., Arias D., Esquivel E., Briceño E. 2015. Paquetes silviculturales en plantaciones de alta densidad. Seminario Energías Alternativas, Universidad Técnica Nacional, Atenas, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.3341.9287
- Guevara-Bonilla M., Esquivel E., Briceño E., Arias D., Molina S. 2015. Cambios en el carbono en el suelo en plantaciones dendroenergéticas en la Zona Norte de Costa Rica. XIV Congreso Forestal Mundial. Durban, South Africa. DOI: 10.13140/RG.2.1.2045.0321.
- Henríquez C., Bertsch F. & Salas R. (1995). Fertilidad de suelo: Manual de laboratorio. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 64 p.
- Esquivel E., Briceño E., Guevara M., Arias D., Calvo M. 2015. Bioenergía sustentable a partir de plantaciones forestales para el beneficiado de café en Zonas Altas de Costa Rica caso Coopetarrazú. XIV Congreso Forestal Mundial. Durban, South Africa. DOI: 10.13140/RG.2.1.2569.3200
- Esquivel E., Arias D., Briceño E., Guevara M., Chavarría A., Camacho D., Moreira I., Arnáez E., Canessa R., 2015. Dendroenergía: Plantaciones Forestales hacia la Producción de Biomasa para Múltiples Propósitos. Taller "Validación de paquetes tecnológicos para la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas, silvícolas, agroindustriales y otros. Ciudad de México. México. DOI: 10.13140/RG.2.1.1520.7444
- Esquivel E., Molina S., Arias D., Briceño E., Guevara M. 2015. Energía sustentable en Costa Rica producida por el Ingenio Taboga a partir de biomasa proveniente de plantaciones dendroenergéticas. VIII Congreso Nacional de Suelos. San José y Tambor, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.4928.6161
- Esquivel E., Molina S., Arias D., Briceño E., Calvo M., Canessa R., Camacho D., Chavarría A., 2014. Sustainable Energy for coffee mills from wood energy plantations Coopetarrazú. XXIV Congreso IUFRO. Salt Lake City, USA. DOI: 10.13140/2.1.3941.0244
- Molina S., Esquivel E., Arias D., Briceño E., Canessa R. Camacho D., Chavarría A. 2014. Initial yield of biomass production in wood energy plantations in Guanacaste province, Costa Rica. XXIV Congreso IUFRO. Salt Lake City, USA. DOI: 10.13140/2.1.4989.6001
- Esquivel E. 2014. Charla Magistral: Plantaciones Dendroenergéticas. XVIII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ciencias Forestales. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.2831.4649
- Molina S., Esquivel E., Arias D., Briceño E., Camacho D., Canessa R., Guevara M., Chavarría A. 2014. Cuantificación de Carbono secuestrado en el suelo bajo plantaciones dendroenergéticas en Costa Rica. XVIII Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ciencias Forestales. San José, Costa Rica.

- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2014. 3PG a management tool for bioenergy plantations modelling in Chile. Contact Meeting, Forest Productivity Cooperative, USA.
- MacDicken, K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest Carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI).
- Molina S., Esquivel E., Briceño E., Arias D., Camacho D., Canessa R., Chavarría A. 2014. Diferencia en la captura de Carbono entre especies exóticas y nativas de Costa Rica. XVI Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología y Sociedad. San José, Costa Rica.
- Murphy J. & Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27:31-36.
- Esquivel E., Molina S., Briceño E., Arias D., Camacho D., Canessa R., Chavarría A. 2014. Uso de árboles para energía, una realidad sustentable para Costa Rica. XVI Congreso Nacional de Ciencia, Tecnología y Sociedad. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.3880.0404
- Navarro R., Esquivel E., Briceño E., Arias D. 2014. Estimating aboveground biomass for *Eucalyptus saligna* Sm. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn in the center region of Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* V 11n 27, p 22 - 33. ISSN: 2215-2504 DOI: 10.18845/rfmk.v11i27.1775
- Esquivel E. 2013. Dendroenergía: una posibilidad para Costa Rica. *Revista Germinar*. Costa Rica. Ene3 (10), 9-10.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2013. Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la Región de Biobío, Chile. *Revista Árvore* V 37 n 6, p 1135-1144. DOI: 10.1590/S0100-67622013000600015
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2013. Dinámica del Nitrógeno y Fósforo en plantaciones dendroenergéticas, en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile. IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano Iguazú 2013, AFoA, INTA, Misiones, FAO, Iguazú, Argentina. DOI: 10.13140/RG.2.1.3355.7527
- Esquivel E. 2013 Efectos ambientales de las plantaciones de árboles para energía. XV Congreso Nacional y I Centroamericano de Ciencia, Tecnología y Sociedad. Liberia Guanacaste, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.1258.6005
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2013. Dinámica del Potasio y Boro en la Primera Rotación de Plantaciones Dendroenergéticas en la Región del Biobío, Chile. III Congreso de IUFRO Latinoamérica 2013, CATIE -IUFRO. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.1002.6008

- Sandoval, S., Cancino, J., Rubilar, R., Esquivel, E., Acuna, E., Munoz, F., Espinosa, M. 2012. Probability Distributions in High-Density Dendroenergy Plantations. *Forest Science*, 58(6), 663-672. DOI: 10.5849/forsci.11-028
- Esquivel E. 2012. Dendroenergía: una forma diferente para el manejo forestal de bosques y plantaciones. Seminario: Alternativas Energéticas de Costa Rica. VIE, PELTEC, TEC & CTEC. San Carlos, Costa Rica.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2012. Dinámica del carbono en suelo y eficiencia del uso de nutrientes en plantaciones dendroenergéticas. VII Congreso de Suelos 2012, Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo. San José, Costa Rica. DOI: 10.13140/RG.2.1.4410.4725
- Esquivel E., Rubilar R., Acuña E., Cancino J., Muñoz F., Espinosa M. 2012. Sustainability of Short Rotation Forest Crops for Bioenergy at Three Contrasting Soil-Site Conditions. ASA, CSSA, and SSSA International Annual Meetings, Cincinnati, Ohio, USA.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2011. Dinámica del carbono de la primera rotación de plantaciones dendroenergéticas en la Región de Biobío, Chile. EULOQUIOS 2011, EULA, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2011. Dinámica del carbono y el nitrógeno en plantaciones forestales dendroenergéticas en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. Conferencia BIOMASA 2011, Energía de la Biomasa para Chile. Santiago, Chile.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2011. Dinámica del carbono y el nitrógeno en plantaciones forestales dendroenergéticas en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. Tercer Seminario Interuniversitario de Estudiantes de Postgrado UdeC-UACH, Concepción, Chile.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2011. Carbon dynamics and nitrogen accumulation in short-rotation plantations of *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus*, *E. nitens* and *Acacia melanoxylon* for production of energy in sandy and granite soils of the Bío-Bío Region, Chile. Contact Meeting, Forest Productivity Cooperative, Blacksburg, Virginia, USA.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2011. Dinámica del carbono en tres temporadas de crecimiento en plantaciones forestales de corta rotación para la producción de energía en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile.
- Esquivel E. 2010. Bioenergía y el efecto de las cosechas de residuos forestales. 1000 Científicos 1000 Aulas, Explora CONICYT. Concepción, Chile.

- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Extracción de nutrientes del suelo mineral en la producción de biomasa con especies forestales de rápido crecimiento para la producción de energía en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. V Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Temuco, Chile.
- Esquivel E., Rubilar R., Cancino J. 2010. Efecto a los dos años de la manipulación de residuos de cosechas forestales en el carbono del suelo mineral. XIII Congreso Agropecuario y Forestal. Heredia, Costa Rica.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Sustainability of *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis* and *Acacia melanoxylon* Bioenergy Plantations in Granitics and Sandy Soils. Contact Meeting, Forest Nutrition Cooperative, North Carolina, USA.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Extracción de nutrientes del suelo mineral en la producción de biomasa con especies forestales de rápido crecimiento para la producción de energía a los 23 meses en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. XIII Congreso Agropecuario y Forestal. Heredia, Costa Rica.
- Sandoval S., Cancino J., Valdebenito B., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Evaluación de daño causado por *Ectinogonia buqueti* (Spin.) (Coleoptera: Buprestidae) en plantaciones dendroenergéticas. V Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Temuco, Chile.
- Cortés R., Sandoval S., Cancino J., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Crecimiento y rendimiento inicial en biomasa aérea en especies destinadas a dendroenergía. V Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Temuco, Chile.
- Sandoval S., Cancino J., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Distribuciones de probabilidad en ensayos dendroenergéticos. V Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Temuco, Chile.
- Ruiz I., Sandoval S., Cancino J., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2010. Funciones de biomasa aérea individual en ensayos dendroenergéticos. V Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Temuco, Chile.
- Esquivel E., Rubilar R., Sandoval S., Acuña E., Cancino J., Espinosa M., Muñoz F. 2009. Producción de biomasa forestal con especies de rápido crecimiento y mediante cortas rotaciones para la generación de bioenergía en dos sitios marginales de la Región del Bío-Bío, Chile. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, Argentina.
- Valdebenito B., Sandoval S., Esquivel E., Acuña E., Espinosa M., Cancino J., Rubilar R., Muñoz F., Cerda L. 2009. First report of *Ectinogonia buqueti* (Spinola) (coleoptera: buprestidae) in dendroenergetic plantations of *Eucalyptus camaldulensis* in Chile. *New Forests*. 38 (3): 241-244. DOI: 10.1007/s11056-009-9151-x

- Sandoval S., Cancino J., Valdebenito B., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2009. Evaluación de daño causado por *Ectinogonia buquetti* (Spin.) (Coleoptera: Buprestidae) en plantaciones dendroenergéticas. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, Argentina.
- Sandoval S., Cancino J., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2009. Efecto del espaciamiento sobre el crecimiento y rendimiento en biomasa aérea en especies destinadas a dendroenergía. XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, Argentina.
- Sandoval S., Cancino J., Valdebenito B., Esquivel E., Acuña E., Rubilar R., Espinosa M., Muñoz F. 2008. Presencia de *Ectinogonia buquetti* (Spin.) (Coleóptera: Buprestidae) en un ensayo de corta rotación para fines dendroenergéticos. IV Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Universidad de Talca, Talca, Chile.

TESIS RECOMENDADAS

Calvo Murillo, Maureen. Marzo 2016 Sostenibilidad ecológica de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus saligna* Smith y *Eucalyptus teriticornis* Smith, en el cantón de Tarrazú. Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

VIDEOS

- <http://audiovisuales.uned.ac.cr/mediateca/videos/175/análisis-de-suelos-1-reseña-histórica-parte-i>
- <http://audiovisuales.uned.ac.cr/mediateca/videos/176/análisis-de-suelos-2-reseña-histórica-parte-ii>
- <http://audiovisuales.uned.ac.cr/mediateca/videos/791/análisis-de-suelos-4-textura-del-suelo>
- <http://audiovisuales.uned.ac.cr/mediateca/videos/770/análisis-de-suelos-5-estructura-del-suelo>
- <http://audiovisuales.uned.ac.cr/mediateca/videos/173/análisis-de-suelos-6-llueve-sobre-mojado>