

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**CAMBIO EN LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO
MEDIANTE UN SISTEMA TAUNGYA COMO POSIBLE
ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE SITIOS, SAN
CARLOS, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

ESTEPHANIE ROBLES CORDERO

CARTAGO, COSTA RICA

MARZO, 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**CAMBIO EN LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO
MEDIANTE UN SISTEMA TAUNGYA COMO POSIBLE
ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE SITIOS, SAN
CARLOS, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

ESTEPHANIE ROBLES CORDERO

CARTAGO, COSTA RICA

MARZO, 2021

CAMBIO EN LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO MEDIANTE UN SISTEMA TAUNGYA COMO POSIBLE ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE SITIOS, SAN CARLOS, COSTA RICA

Estephanie Robles Cordero *

RESUMEN

La implementación de prácticas extensivas pecuarias y agrícolas no sustentables en Costa Rica han degradado las condiciones naturales de los suelos, limitando su capacidad productiva. En búsqueda de soluciones se deben identificar los factores que interfieren con la metodología llamada Capacidad de Uso de las Tierras Agroecológicas es una herramienta muy eficaz, también, es una práctica sencilla y rentable para recuperar sitios degradados es el establecimiento de sistemas agroforestales. En una finca en Pital de San Carlos se implementó un sistema agroforestal (SAF) con *Gmelina arborea* como componente arbóreo y *Manihot esculenta* y *Curcuma longa* como componente agrícola en un sitio empleado anteriormente como potrero y piñero, bajo condiciones de manejo no sustentables. Se realizó una comparación de la capacidad del uso de las tierras del 2018 y 2020, además de un análisis químico de suelos. Durante los primeros 30 meses de establecido el SAF para el área A se mejoró de una clase VI a una clase IV y para el uso anterior de potrero, se mejoró la capacidad de uso del suelo de una clase IV a una clase II, mejorando aspectos importantes de fertilidad como SA%, calcio, magnesio, entre otros. La implementación del sistema agroforestal, junto con prácticas sustentables de manejo, como encalado, logró mejorar en un periodo de 30 meses un suelo que estaba degradado.

Palabras claves: SAF, Recuperación de sitios, Capacidad de uso del suelo, Melina, Propiedades Químicas de suelo, taungya.

ABSTRACT

The implementation of unsustainable extensive livestock and agricultural practices in Costa Rica have decreased the natural soil conditions, limiting their productive capacity. In search of solutions, the limiting factors need to be identified, where the methodology called Agroecological Land Use Capacity is an effective tool. A simple and cost-effective practice to recover degraded soils is the establishment of agroforestry systems. On a farm in Pital of San Carlos, an agroforestry system (AFS) was established with *Gmelina arborea* as tree component and *Manihot esculenta* and *Curcuma longa* as agricultural crop, in a site previously used as pasture and pineapple crop, under no sustainable conditions. Land use capacity comparison between 2018 and 2020 was made, in addition to a chemical analysis of the soil. During the first 30 months of the agroforestry system, the land use capacity was enhanced, in the area previously used as pineapple crop from a Class VI into a Class IV, and in the area previously used as pasture was enhanced from a Class IV into a Class II, improving important fertility aspects such as the percentage of acidity saturation, calcium, magnesium, between others. The implementation of the agroforestry system along with soil management sustainable practices, such as liming, achieved an improvement on a degraded soil in a period of 30 months.

Key words: AFS, Site recovery, Land use capacity, Melina, Chemical property of soil, taungya.

*E. Robles-Cordero, "Cambio en la capacidad de uso del suelo mediante un sistema taungya como posible alternativa para la recuperación de sitios, San Carlos, Costa Rica", Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2021.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por PhD. Edwin Esquivel Segura, MSc. Mario Guevara Bonilla y MSc. Maribel Jiménez Montero, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Edwin Esquivel Segura PhD.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Director de Tesis

Maribel Jiménez Montero MSc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Profesora lectora

Mario Guevara Bonilla MSc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Profesor lector

Dorian Carvajal Venegas MSc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Coordinador Trabajos Finales de
Graduación



Estephanie Robles Cordero
Estudiante

DEDICATORIA

A mi madre,

a la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por siempre creer en mí, por su amor y enseñanzas.

A mi madre, a Emiliano, a Mami Isa y a Papi Quina.

A mis amigos de la vida y Universidad, más allá de siempre contar con su apoyo académico, por las vivencias y espacios de liberación: JuanCa, Prisci y Jair.

A mi compañero de vida, por nunca dejar que me rindiera.

A mis guías académicos en mi proceso universitario, por el apoyo y amistad.

A los profesores: Luis Acosta, Edwin Esquivel, Alejandro Meza.

A la Escuela de Ingeniería Forestal por el acompañamiento y apoyo, más allá de lo académico, durante mi estancia en la Universidad.

Al Programa de Investigación y Extensión en Silvicultura Intensiva por la oportunidad y recursos brindados para llevar a cabo mi proyecto de graduación.

A todas las personas que de una u otra manera han sido parte de este proceso.

¡Gracias infinitas a todos!

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	4
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos	4
MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
1.3. Área de estudio	5
1.4. Recolección de datos	8
1.5. Análisis de datos	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
CONCLUSIONES	24
RECOMENDACIONES	24
REFERENCIAS.....	25

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Denominación y descripción de cada análisis de suelo realizado en la finca El Arado, Pital, San Carlos, Costa Rica.	8
Cuadro 2. Resultados del análisis químico del suelo, por uso anterior, por profundidad en el tiempo, desde antes del establecimiento al año 2020, Pital, San Carlos, Costa Rica.	17
Cuadro 3. Valores promedio de los parámetros para la determinación de la fertilidad de la metodología para determinar la capacidad de uso del suelo, de acuerdo con el uso anterior y momento de análisis para el sitio de estudio, Pital, San Carlos.	19
Cuadro 4. Cuadro de campo comparativo de la determinación de la clase de capacidad de uso del suelo del SAF, para mayo 2018 y octubre 2020, para el área A, San Carlos, Pital, Costa Rica.	22
Cuadro 5. Cuadro de campo comparativo de la determinación de la clase de capacidad de uso del suelo del SAF, para junio 2017 y octubre 2020, para el área B, San Carlos, Pital, Costa Rica.	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y clasificación por ocupación anterior (2018), 2020, Pital, San Carlos, Costa Rica.	5
Figura 2. Línea de tiempo de las actividades realizadas en el área de estudio, Pital, San Carlos, Costa Rica.	7
Figura 3. Cambio de materia orgánica (MO) con límites de confianza bajo un valor de significancia de 0,05, para los tiempos de análisis M18, A19 y O20, según uso anterior y profundidad, Pital, San Carlos, Costa Rica.	11

INTRODUCCIÓN

La capacidad de la tierra para sostener vida se determina en gran medida por la calidad del suelo presente y es muy probable que la dependencia de la humanidad aumente con el pasar de las décadas [1]. Esta base de recursos cada día se ve más reducida por la urbanización, sobreexplotación y degradación [1]–[3]. En 40 años, en el mundo se ha perdido aproximadamente un tercio de la tierra arable por la erosión causada por las actividades humanas y cada año se pierden millones de hectáreas más [2].

La degradación de las tierras en Costa Rica fue causada principalmente por la expansión de la ganadería de carne en la década de 1960 y 1970, que provocó la tala raza de cobertura boscosa en áreas frágiles, por condiciones edáficas, climatológicas o pendientes. Después de la deforestación, en algunos sectores del país se desarrollaron actividades agrícolas sin el acompañamiento técnico o prácticas de manejo que condujo a condiciones con mayor grado de degradación. [4]–[6]. Según el último Programa de Acción de Lucha contra la Degradación en Costa Rica, para el 2001, el 19,8% de las tierras se encuentra en sobreuso [4].

El suelo podría considerarse un recurso renovable si se le diera el cuidado adecuado; sin embargo, por la escala de sobreexplotación que conlleva la vida humana, hoy no puede considerarse de esa forma [1]. La conservación de suelos comúnmente se enfoca en el control de erosión, pero no se puede considerar como elemento único, pues se correlaciona con mantenimiento de la fertilidad para evitar la degradación física, química y biológica [7]. Determinar la capacidad de uso de las tierras permite una planificación sostenible de las diferentes actividades productivas [8], identificando los parámetros limitantes que estén restringiendo la utilización de los suelos según la actividad para corregirlos con buen manejo y conservación de los suelos.

Los sistemas agroforestales (SAF) pueden entenderse como una estrategia importante para la conservación del suelo, adaptación al cambio climático, mantenimiento de la biodiversidad, así como contribuir a garantizar la seguridad alimentaria e incrementar la adaptabilidad de los sistemas agrícolas [2], [9]–[12]. Tal como se define en la legislación costarricense, en la Ley Forestal 7575 un SAF es una “forma de usar la tierra que implica la combinación de especies forestales en tiempo y espacio con especies agronómicas, en procura de la sostenibilidad del sistema” [13].

El establecimiento de los SAF surge ante la necesidad que tienen los productores de diversificar sus cultivos agrícolas por condiciones en sus fincas como laderas, problemas de erosión, cambios inadecuados del uso de la tierra y extensión reducida [12], [14]. A lo largo de los años se ha estudiado la mejora de los suelos por parte de los árboles de los sistemas agroforestales, evidenciando ventajas en la conservación de los suelos y el mantenimiento de la producción y fertilidad [7], [15], [16].

La incorporación de árboles en combinación con otros sistemas productivos tiene efectos favorables para el manejo y conservación de suelos. Los árboles ayudan a mantener la materia orgánica de estos por la caída de hojas, ramas y frutos, lo cual es esencial en para mantener la fertilidad del suelo [17]. De igual forma, con la incorporación de materia orgánica se promueve la restauración de nutrientes agotados, ya que la hojarasca es fuente importante de materia orgánica [18], [19].

Diversos estudios han evidenciado mejoras en las propiedades y elementos del suelo, por ejemplo Dollinger y Shibu [20] realizan una recopilación de 28 artículos que reafirman que los SAF pueden mejorar muchas métricas de suelo, un ejemplo de esto es el enriquecimiento del carbono orgánico, la mejora de la fertilidad y la disponibilidad de nutrientes o mejora de dinámicas microbiológicas en el suelo.

Es vital que la producción forestal en Costa Rica logre adaptarse a las condiciones reales que cuentan los productores hoy y a las nuevas tendencias de sistemas más integrales. Una de las especies forestales es la melina, de las principales especies utilizadas por el sector forestal en Costa Rica [21], [22] debido a su potencial para obtener productos de alto valor agregado [23].

Por tal motivo, surge la necesidad de incorporarla a sistemas más integrales que mejoren la calidad del suelo y que permitan que los productores a futuro puedan financiar los costos de extracción, transporte y aserrío, costos que han contribuido al decrecimiento del cultivo de madera [21]. El objetivo del estudio fue evaluar los cambios de capacidad de uso sufridos por un suelo que fue dedicado a la ganadería y el cultivo de piña, tras 30 meses de implementar un SAF con *Gmelina arborea* Robx. como componente arbóreo y *Manihot esculenta* Crantz., en el primer año y *Curcuma longa* L., en el segundo, estas últimas como componente agrícola.

OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Evaluar el cambio en la capacidad de uso de los suelos en el campo agrícola por la implementación de un sistema taungya de *Gmelina arborea* Robx (melina) en asociación con *Manihot esculenta* Crantz. (yuca, variedad señorita) y *Curcuma longa* L. (cúrcuma) en suelos de uso agrícola y pecuario.

1.2. Objetivos específicos

- 1.2.1. Determinar la composición química de un suelo dedicado con anterioridad a la producción de piña y utilizado como potrero a lo largo del tiempo a partir de la implementación de un SAF taungya.
- 1.2.2. Interpretar el cambio en las condiciones químicas del suelo previo y post establecimiento del sistema agroforestal (SAF).
- 1.2.3. Comparar el cambio de la capacidad de uso del suelo antes y después del establecimiento del sistema agroforestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

1.3. Área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en el cantón de San Carlos, en el distrito de Pital, en la finca El Arado, propiedad de Xiomara Murillo Phillips, ubicada en las coordenadas 10° 26' 37.4" N, 84° 16' 16.0" O. El distrito de Pital registra una temperatura promedio anual de 27 °C y con precipitaciones entre 3000-4000 mm/año [24]; se ubica a una altitud promedio de 200 m.s.n.m. y sus suelos son de orden Inceptisol, con pendiente baja [25]. El SAF en estudio se encuentra en la zona de vida Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-P), de acuerdo con el mapa de distribución geográfica de las zonas de vida de Holdridge de Costa Rica del 2005 [26].

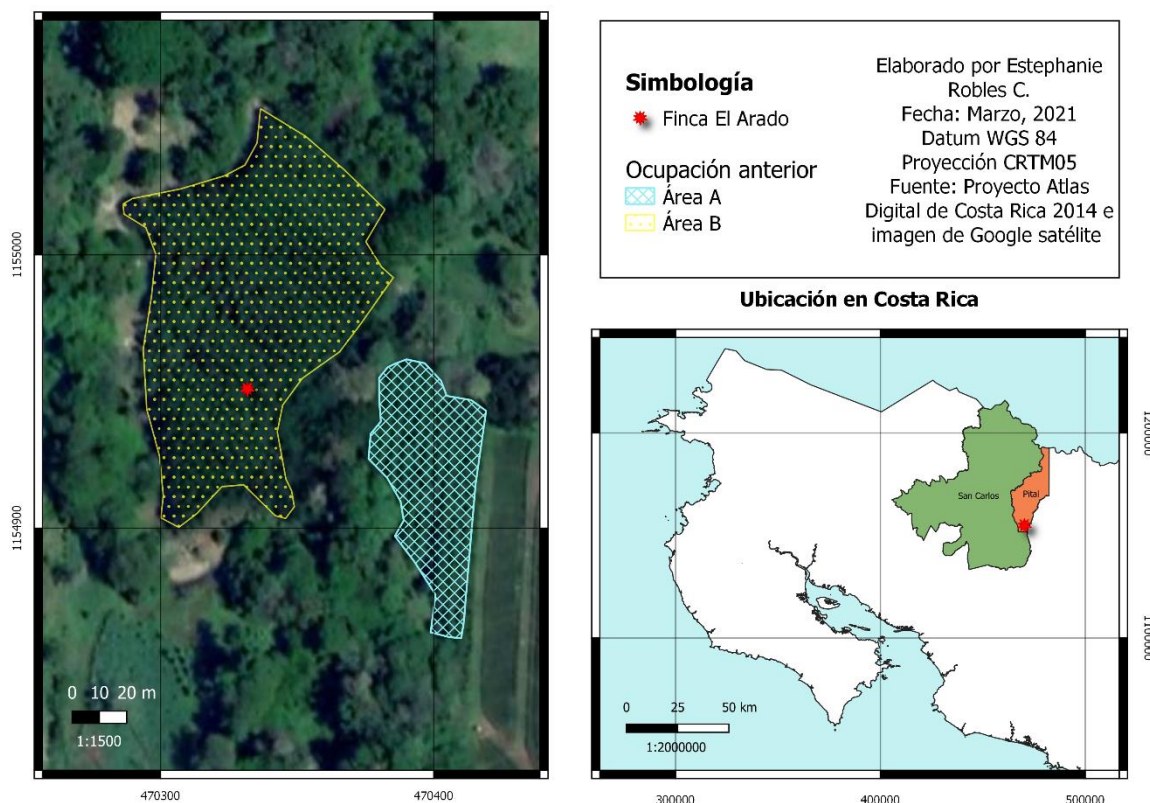


Figura 1. Ubicación del área de estudio y clasificación por ocupación anterior (2018), 2020, Pital, San Carlos, Costa Rica.

Sistema agroforestal implementado

El sitio de estudio se dividió en dos áreas, según la ocupación que tuvo con anterioridad al 2017, un área que se utilizó para el cultivo de piña desde el año 2008, designada como área A y otra área que fue dedicada por más de 40 años a potrero con una cabeza de ganado por hectárea, para efectos del estudio designada área B, ambas esclarecidas en la Figura 1.

En el año 2017 se realizó un muestreo de suelos para el área B, para determinar las condiciones del suelo y establecer un plan de mejoras al establecer el SAF. De análisis se tomaron los datos bases para la determinación de propiedades químicas del suelo en el área B. Para el área A, el análisis inicial se realizó en mayo de 2018, justo antes del establecimiento del componente arbóreo.

El sitio de estudio corresponde a un área de 12000 m² de sistema agroforestal taungya, establecido el 19 de mayo de 2018. El componente principal fue el componente arbóreo, establecido con la especie *Gmelina arborea*, plantada a un distanciamiento de 3x4 m, en el primer año se implementó la *Manihot esculenta* Crantz. como componente agrícola, variedad señorita y *Curcuma longa* L. en el segundo año. En la **Figura 2** se ilustra una línea de tiempo de las actividades realizadas en el área de estudio.

La preparación del terreno inició tres meses antes del establecimiento del taungya, el sitio fue mecanizado con tres pasadas de rastra de disco, una pasada de subsolador a 60 cm de profundidad y una última pasada con una alomilladora utilizada en el área A, dejando lomillos distanciados a 1 m.



Figura 2. Línea de tiempo de las actividades realizadas en el área de estudio, Pital, San Carlos, Costa Rica.

A los cuatro y a los siete meses de establecido el componente arbóreo se realizó una poda de formación y se dejaron los residuos de la poda en el sitio. En diciembre del 2017 se aplicó 1 Mg/ha de carbonato de calcio en el área B, seis meses antes de plantar se realizó una aplicación de 1 Mg/ha de carbonato de calcio en la totalidad del área y al momento del establecimiento se aplicó 1 Mg/ha de carbonato de calcio y magnesio, conocida como cal dolomita en la totalidad del área, igualmente, antes del establecimiento.

Cuadro 1. Denominación y descripción de cada análisis de suelo realizado en la finca El Arado, Pital, San Carlos, Costa Rica.

Año	Mes	Denominación	Época	Descripción
2017	Junio	J17	Lluviosa	Realizado solo para el área B, antes de cualquier práctica de manejo del suelo.
2018	Mayo	M18	Lluviosa	Realizado luego de la labranza, doble aplicación de carbonato de calcio en el área B y una aplicación de cal dolomita en el área A, pero antes del establecimiento del SAF.
2018	Noviembre	N18	Transición	Realizado después de la poda.
2019	Abril	A19	Transición	Realizado luego de otra poda, control de malezas, encalado total con carbonato de calcio y una aplicación de cal dolomita al área B, cultivo y cosecha de yuca.
2020	Octubre	O20	Lluviosa	Realizado luego de la siembra de cúrcuma.

1.4. Recolección de datos

Propiedades Químicas

Se realizó un muestreo de suelos para los años del 2017 al 2020 (J17, M18, N18, A19 y O20). Se establecieron 20 puntos de muestreo y en cada uno se hicieron dos recolectas, una de 0-20 y otra de 20-40 cm de profundidad, utilizando un barreno tipo holandés, cada profundidad de muestreo se mezcló para conformar la muestra que sería utilizada para el análisis en laboratorio.

Para el análisis, las muestras fueron debidamente etiquetadas, transportadas al laboratorio y secadas al aire por 24 horas, luego se enviaron al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR). Se solicitó un análisis químico completo KCI-OLSEN+CN.

La determinación de materia orgánica se determinó también a partir de la muestra compuesta por el método de pérdida de peso por ignición WLOI (Weight-Loss-On-Ignition) [27].

Clase de capacidad de uso

La metodología para diagnosticar la capacidad de uso de la tierra debe estar adaptada a las condiciones propias de un país [8], debido a que refleja la capacidad que naturalmente tienen las tierras de sostener diferentes formas de uso [5]. Para determinar la capacidad de uso de la tierra antes y después del establecimiento del SAF, se realizó un diagnóstico técnico de los parámetros necesarios para la clasificación mediante el Decreto Ejecutivo N° 41960-MAG-MINAE *Establecimiento de la Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras Agroecológicas de Costa Rica* [8].

Asimismo, para determinar la clase de capacidad de uso se utilizaron los análisis de suelo M18 como inicio del área A y J17 como inicio del área B y el análisis del año 2020, O20, determinando el cambio a lo largo del estudio.

La determinación de la textura del suelo se realizó por medio del método organoléptico [28]. La fertilidad es una combinación de suma de bases, acidez, pH y saturación de acidez, que se definió por medio del análisis químico de suelo así como la toxicidad de cobre y la salinidad (conductividad eléctrica del estrato saturado del suelo, CE). Los parámetros como zona de vida y periodo seco se determinaron por medio de una búsqueda literaria en publicaciones con datos de la región en la que se encuentra el sitio de estudio. Otros parámetros se evaluaron con observaciones de campo, como la pendiente, neblina, viento y drenaje.

1.5. Análisis de datos

Propiedades químicas

Se realizó un análisis de varianza ANDEVA para los datos de porcentaje de materia orgánica (MO%) por uso anterior anual, posteriormente se aplicó una prueba Tukey ($\alpha= 0,05$) a las medias, que permitió identificar diferencias significativas entre los años evaluados. Anterior a estas pruebas, se verificó los supuestos de normalidad y homocedasticidad. También, se determinó el coeficiente de variación y los límites de confianza. Para todos los análisis se utilizó el programa RStudio. A los resultados del análisis químico de suelo se les determinó el promedio, desviación y el error estándar por año de evaluación.

Clase de capacidad de uso

Con la recolección de datos se procedió a realizar una tabla de campo con datos agrupados por subclases para determinar la capacidad de uso, la subclase y la unidad de manejo, y así determinar los factores (limitantes) y las posibles medidas correctivas en cada año así como las (limitantes). Para la categoría de fertilidad se promedió los datos de profundidad por uso anterior para determinar el cambio de clase de cada una de las áreas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades químicas del suelo

Materia orgánica

Los resultados graficados en la Figura 3 muestran valores promedio de porcentaje de materia orgánica por uso anterior y por profundidad. Para el análisis M18 se reflejaron porcentajes de materia orgánica de entre 11,69% (Piña 20-40 cm) y 14,02% (Potrero 0-20 cm). La poda realizada a la melina en el mes de setiembre y diciembre del año 2018, donde se dejó los residuos en el suelo, que hace suponer que pudo haber influenciado en el aumento del porcentaje de materia orgánica en el suelo, para el análisis realizado en abril de 2019.

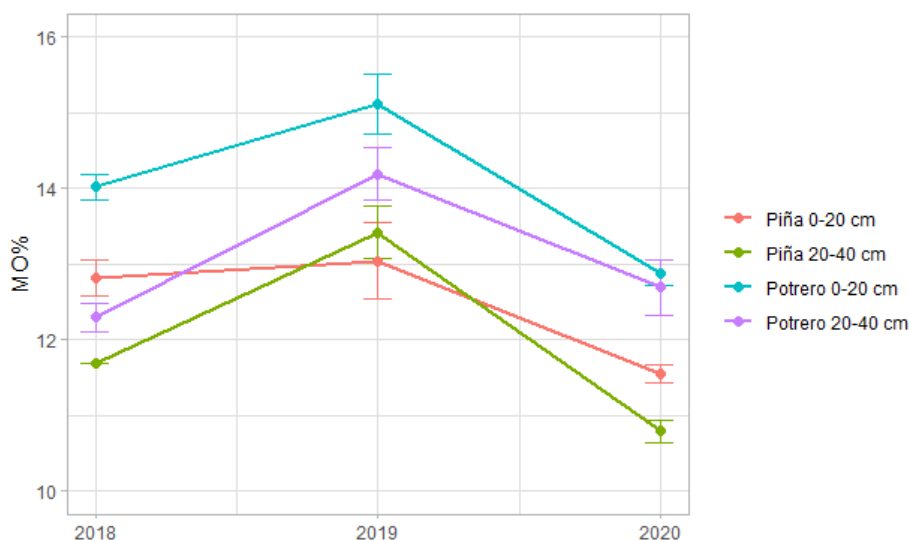


Figura 3. Cambio de materia orgánica (MO) con límites de confianza bajo un valor de significancia de 0,05; para los tiempos de análisis M18, A19 y O20, según uso anterior y profundidad, Pital, San Carlos, Costa Rica.

En datos no publicados, en la propiedad se han realizado observaciones en bolsas para evaluar la tasa de descomposición de las hojas y esta no tardan los dos meses en descomponerse [29]. Del análisis del año 2019 al año 2020 no se realizó control de malezas o podas. El análisis del año 2020 fue en el mes de octubre, un mes antes de finalizar la época lluviosa en Costa Rica, por lo que se presume que la baja de MO% se puede deber a que en este momento la fracción de MO presente fue principalmente la húmica, que es la más estable y en menor concentración la fracción lábil.

Sin embargo, la diferencia del promedio de materia orgánica del año 2018 al 2020 no es significativa (ANDEVA, $p=0,36$). Los datos obtenidos de materia orgánica fueron normales (Shapiro, $p=0,7433$) y homocedásticos para todas las variables (Levene, uso anterior por año $p=0,7078$). Las diferencias significativas se detectaron entre el uso anterior por profundidad (ANDEVA, $p=0,0002$).

La materia orgánica juega un papel muy importante mejorando la estructura y propiedades del suelo que influyen en la fertilidad [30]–[32], protege el suelo de la erosión y lixiviación de nutrientes y puede ayudar en cierto grado a la fertilización del sitio por ciclaje de nutrientes [30], [33], [34]. En un SAF taungya existe hay una disminución de contenido de materia orgánica durante el periodo de cultivo, si se compara con una plantación sin taungya; sin embargo, estos sistemas agroforestales mantienen contenidos mayores que la agricultura convencional, que si bien no es grande la mejora de la resistencia del suelo a la erosión, es favorable [7]. Con esto, el porcentaje de materia orgánica encontrado en todos los momentos de análisis, considerado como alto [35], se espera que llegue a una estabilización del valor a lo largo del tiempo.

Otras propiedades químicas

En el Decreto Ejecutivo N° 41960-MAG-MINAE, la fertilidad se determina de acuerdo a los valores de suma de bases intercambiables (Ca, Mg y K), pH en agua, acidez intercambiable y porcentaje de saturación de acidez [8].

En todo momento los valores de acidez están fuera del rango óptimo menor a 0,3 $\text{cmol}^{(+)}/\text{l}$, según Molina y Meléndez [35]. La mejora presentada fue en el área B y en la profundidad de 0-20 cm, que si bien está lejos de estar cercano al valor óptimo, ya evidencia una baja favorable de $1,6\pm 0,5 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$ a $1,0\pm 0,2 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$ como muestra el Cuadro 2.

El porcentaje de saturación de acidez óptimo es menor al 10% [35], pero no se ha logrado que el suelo llegue a este valor. En ambos usos anteriores se logró una mejora de este porcentaje, a pesar de ello, el área B en la profundidad de 0-20 cm está más cerca de alcanzar el valor óptimo con un valor para el 2020 de 12,0%.

El control de acidez en el suelo para árboles de *G. arborea* es esencial, pues diversos estudios muestran relación entre altos niveles de acidez y la presencia de enfermedades en esta especie, como la *Nectria* spp., principal problema fitosanitario de la melina [22], [36].

En múltiples ocasiones se han demostrado mejoras en el crecimiento de los árboles cuando los suelos presentan contenidos menores de acidez, debido a que el pH determina la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana del suelo [20], [37], [38]. Con prácticas de costo menor como el encalado, el crecimiento de árboles y cultivos, puede aumentar, contribuyendo así a la calidad y cantidad de producción de un sitio [39].

En ningún momento de la evaluación se logró subir el nivel de pH a más de 5. Según revela un estudio de fertilidad de los suelos agrícolas en Costa Rica, el rango de pH oscila entre 4,5 y 6,7 para la mayor parte del país, por lo que encontrar un valor fuera de ese ámbito es poco factible y para el cantón de Pital de San Carlos más del 50% de los sitios muestreados en ese estudio presentaron problemas de pH bajo (<5,5) [40]. Si bien el nivel de pH aún necesita ser incrementado para llegar al valor óptimo (5,5 [40]), algunos elementos que también constituyen la categoría de fertilidad, como lo son el calcio, magnesio y potasio, quienes en conjunto suman las bases intercambiable, pueden ser mejorados mediante prácticas de manejo y conservación de suelo. El elemento que presentó una mejora más notable fue el magnesio en el área B, que para las últimas dos evaluaciones (A19 y O20) pasó de un estado bajo (<1 cmol⁽⁺⁾/l) a un estado medio (1-3 cmol⁽⁺⁾/l), en mejor proporción entre de los primeros 20 cm de suelo.

El elemento Ca tiene una resultante mejora en los primeros 20 cm de suelo para todos los tiempos de evaluación, excepto para antes del establecimiento inicial, debido a la adición de enmiendas antes y después del establecimiento del SAF en ambas áreas de estudio. Según menciona Alvarado y Raigosa [41], la disponibilidad de elementos como calcio y fósforo disminuye con la acidez del suelo, pero aumenta la disponibilidad de elementos como hierro, cobre, manganeso y zinc, para este estudio coincide con los elementos de zinc y cobre (Cuadro 2).

El elemento K solo mejoró en el tiempo para el rango de 0-20 cm de profundidad para ambos usos, donde los valores obtenidos pueden clasificarse en un rango medio [35]; sin embargo, para el último momento de análisis el valor se clasificó en bajo de acuerdo con su valor óptimo. Se ha observado que en plantaciones forestales, aumenta el nivel de potasio debido a la tendencia de entre más biomasa, mayor cantidad de biomasa [42], más no en sistemas mixtos como los SAF, debido a que los cultivos agrícolas tienden a ser demandantes de este elemento para la formación del cultivo, en este caso de la yuca, la cual es muy extractiva de este nutriente [43].

Diversos estudios han demostrado el efecto de mejora que puede atribuir el encalado al suelo [39], [46], [47], y este se evidencia en la mejora de los valores obtenidos del primer muestreo del área B al momento justo antes del establecimiento. Los valores de SA%, para la profundidad de 0-20 cm tuvieron un valor en J17 de $25,0 \pm 12,5\%$ y bajaron a $11,4 \pm 15,30\%$, la misma tendencia se presentó para la profundidad de 20-40 cm pasaron de $42,2 \pm 12,5\%$ para J17, a $26,5 \pm 15,30\%$, acorde al Cuadro 2.

Igualmente, para el parámetro de acidez se evidenció una mejora del J17 al M18 en ambas profundidades, para el área B pasó de $1,6 \pm 0,5 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$ a $0,8 \pm 0,7 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$ y en la profundidad de 20-40 cm pasó de $2,2 \pm 0,5 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$ a $1,7 \pm 0,7 \text{ cmol}^{(+)}/\text{l}$, por lo que coincide con los estudios que demuestran la contribución de mejora del suelo por medio del encalado.

En un estudio para evaluar el estado nutricional de la plantación de melina, realizado en la Finca el Arado en el año 2019, Ramírez-Mesén presentó datos de dos análisis químicos foliares para marzo y mayo del mismo año, en uno de los puntos de muestreo el manganeso registró un valor de 720 mg/kg en el mes de marzo y bajó a 580 mg/kg para el mes de mayo [44], asimismo, la tendencia continuó para los otros puntos de muestreo. La acidez en los suelos tiene relación con la toxicidad de manganeso en las plantas [22], [45]. Los suelos del área evaluada en este estudio han sido ácidos, con valores que han oscilado entre 3,2 cmol⁽⁺⁾/l y 0,8 cmol⁽⁺⁾/l. En el momento que Ramírez-Mesén evaluó los contenidos químicos foliares de manganeso, no se realizó ninguna enmienda al suelo, sin embargo, los contenidos de Mn mejoraron, lo que permite deducir que el sistema agroforestal es el causante de las mejoras producidas en el suelo para ese momento.

Cuadro 2. Resultados del análisis químico del suelo, por uso anterior y por profundidad en el tiempo, desde antes del establecimiento al año 2020, Pital, San Carlos, Costa Rica.

Uso anterior	Profundidad	Año	pH	Acidez (cmol ⁽⁺⁾ /l)	Ca (cmol ⁽⁺⁾ /l)	Mg (cmol ⁽⁺⁾ /l)	K (cmol ⁽⁺⁾ /l)	Suma de bases (cmol ⁽⁺⁾ /l)	CICE (cmol ⁽⁺⁾ /l)	SA %	P (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	CE (mS/cm)
Piña (Área A)	0- 20 cm	M18	4,7	2,8	1,4	0,3	0,2	2,0	4,8	58,5	3,0	4,0	16,0	117,0	96,0	0,1
		N18	5,0	1,2	3,0	0,9	0,2	4,1	5,3	22,6	2,0	3,2	12,0	138,0	62,0	0,1
		A19	4,7	2,2	1,8	0,4	0,2	2,4	4,7	48,0	2,0	2,3	9,5	125,5	69,5	0,1
		O20	4,7	1,8	2,1	0,6	0,2	2,9	4,6	38,0	1,0	2,6	9,0	126,0	93,0	0,1
	20-40 cm	M18	4,6	3,2	1,2	0,2	0,1	1,5	4,7	67,7	1,0	3,8	18,0	138,0	106,0	0,1
		N18	4,7	2,5	1,5	0,4	0,2	2,1	4,5	54,4	2,0	2,5	16,0	128,0	70,0	<0,1
		A19	4,7	2,3	1,4	0,4	0,1	1,9	4,2	54,8	1,0	2,4	9,5	124,5	76,5	0,1
		O20	4,7	1,5	1,6	0,4	0,2	2,2	3,7	40,0	1,0	1,9	8,0	113,0	98,0	0,1
Potrero (Área B)	0- 20 cm	J17	5,0	1,6	2,9	1,6	0,2	4,7	6,3	25,0	1,0	2,9	11,0	187,0	154,0	0,1
		M18	5,0	0,8	3,9	2,0	0,2	6,0	6,8	11,4	1,0	3,7	14,0	147,0	102,0	0,2
		N18	4,9	1,5	4,5	1,9	0,2	6,6	8,1	18,8	2,0	5,1	20,0	185,0	57,0	0,1
		A19	5,0	1,0	4,0	1,6	0,1	5,8	6,7	14,5	1,0	2,3	10,8	145,8	52,7	0,2
		O20	4,9	1,0	5,0	2,0	0,1	7,1	8,1	12,0	1,0	4,3	13,0	149,0	101,0	0,2
	20-40 cm	J17	5,1	2,2	1,9	1,0	0,1	3,0	5,2	42,7	1,0	1,5	7,0	140,0	77,0	0,1
		M18	5,0	1,7	3,1	1,6	0,1	4,8	6,5	26,5	1,0	3,4	13,0	145,0	94,0	0,1
		N18	4,9	2,4	2,3	0,9	0,2	3,4	5,8	41,5	2,0	4,7	23,0	148,0	40,0	<0,1
		A19	5,1	1,4	2,9	1,2	0,1	4,1	5,5	25,0	1,0	1,8	9,0	150,8	51,7	0,1
		O20	4,9	1,2	3,2	1,4	0,1	4,7	5,8	20,0	ND	3,2	9,0	138,0	64,0	0,1

Capacidad de uso del suelo

Con los resultados de los factores y limitantes evaluadores de la capacidad de uso del suelo para pendiente, se determinó que es ligeramente ondulada, pues se ubica en promedio de entre 4% a 8%. De igual forma, la categoría de erosión se determinó según la metodología del decreto [8] debido a las muestras muy ligeras de pisoteo de ganado en pastos, por lo tanto se categoriza como ligera o leve.

La profundidad efectiva del sitio en estudio se determinó que es mayor a 1,2 m, por lo tanto, se categorizó como muy profundo. La textura obtenida al tacto para todos los momentos de análisis fue arcillosa con menos de 60% de arcilla, por lo que se categorizó como fina. La pedregosidad encontrada en el área de estudio no interfiere en la preparación del suelo, por lo que permite ser categorizado como nula.

La toxicidad de cobre se mide con respecto a las concentraciones de este elemento en el suelo, en la cual, según el análisis químico del Cuadro 2, los valores se ubicaron entre $7,0 \pm 1,3$ mg/l y $23,0 \pm 2,8$ mg/l por lo que permitió ubicar todos los momentos de análisis dentro de la categoría nula. En los resultados de conductividad eléctrica para la determinación de la salinidad en ningún momento de evaluación superaron los 0,2 mS/cm, por lo que se categorizó bajo salinidad nula.

El drenaje para los dos usos anteriores se clasificó como bueno, puesto que el agua se elimina del suelo con facilidad. El riesgo de inundación se clasificó como nulo, ya que ni siquiera se presenta en años excepcionalmente lluviosos.

Para la categoría de periodo seco, según Solano y Villalobos, en la zona de la Región Norte donde se ubica el distrito de Pital no presenta periodo seco [46], por lo que el parámetro se puede clasificar nulo. La neblina se determinó como nula: no presenta obstáculo para el desarrollo de actividades agrícolas productivas. El factor del viento se logró categorizar como moderado: las velocidades van de entre 15-30 km/hora.

La mayor limitante registrada para el sitio en estudio fue la fertilidad, la que determinó la clase de capacidad de uso para cada categoría de uso anterior, tanto para la primera como para la última evaluación. El Cuadro 3 detalla los valores promedio para cada uso anterior con los parámetros que, según la metodología para la determinación de la capacidad de uso, deben ser evaluados para determinar la fertilidad de un sitio.

Cuadro 3. Valores promedio de los parámetros para la determinación de la fertilidad de la metodología para determinar la capacidad de uso del suelo de acuerdo con el uso anterior y momento de análisis para el sitio de estudio, Pital, San Carlos.

Uso anterior	Momento de análisis	pH	Acidez (cmol ⁽⁺⁾ /l)	Suma de bases (cmol ⁽⁺⁾ /l)	SA %
Piña (Área A)	M18	4,7	3,0	1,7	63,1
	N18	4,9	1,8	3,1	38,5
	A19	4,7	2,3	2,2	51,4
	O20	4,7	1,6	2,6	39,0
Potrero (Área B)	J17	5,1	1,9	3,8	33,9
	M18	5,0	1,2	5,4	19,0
	N18	4,9	2,0	5,0	30,2
	A19	5,0	1,2	4,9	19,8
	O20	4,9	1,1	5,9	16,0

La capacidad de uso del suelo identificada para el área evaluada del área A justo antes del establecimiento del SAF (M18) fue de la clase IV (Cuadro 4), unidad de manejo VI e₁₂ s₂₄ c₁₂₄. Esta clase presenta severas limitaciones cuando se habla de uso agrícola anual y semiperennes, y se establece que las plantaciones forestales establecidas en esta clase deben ejecutarse bajo prácticas de manejo adecuadas [8], [47]. La subclase s₂₄ indica la limitación por el factor fertilidad que definió la clase.

Para el último análisis de suelo realizado en el 2020 para el área A la clase de capacidad de uso fue IV, unidad de manejo IV e₁₂ s₂₄ c₁₂₄ (Cuadro 4). Se ubicaba en una clase que se restringe a actividades forestales, cultivo perennes y semiperennes [8], [47]. La subclase s₂₄ continúa indicando la limitación por el factor fertilidad, definiendo la clase.

Para el área B, antes de proceder con cualquier tipo de enmienda o practica de manejo (J17), se ubicó en la clase IV, unidad de manejo IV e₁₂ s₂₄ c₁₂₄. La subclase s₂₄ indica la limitación por el factor fertilidad definiendo la clase

El área B, luego de todas las actividades realizadas de manejo de suelo en 30 meses, se categorizó en una clase de capacidad de uso II, unidad de manejo II e₁₂ s₂₄ c₁₂₄ (Cuadro 5). En esta clase se permite el desarrollo de cualquier actividad agrícola, forestal o pecuaria y su selección no dependerá tanto de limitantes sino de factores sociales, económicos, de asistencia técnica y de requerimiento de la especie a cultivar [8]. Sin embargo, ahora se deben considerar más limitantes: para la subclase e₁₂ las limitantes son la pendiente y erosión, para la subclase s₂₄ la limitante es la textura de suelo y la fertilidad y para la subclase c₁₂ las limitantes son la zona de vida y el periodo seco.

Presentar más limitantes dentro de una clase genera que la selección de la actividad deba ser bien estudiada, pues debe ser capaz de soportar todas las limitantes y tener un óptimo uso o rendimiento.

La unidad de manejo en la que se encuentra el suelo en el año 2020 para ambas clasificaciones de uso anterior presenta limitantes que son más difíciles o no son posibles de modificar, como la pendiente, textura, zona de vida, periodo seco y viento, por lo que el cultivo que se desee introducir deberá soportar estas limitantes que no se pueden modificar. El parámetro limitante que presenta mayor posibilidad de modificación en esta unidad de manejo es la fertilidad.

Una notable mejora se evidencia en el área B respecto a su valor inicial, de un promedio de 33,9% baja a 16,0% de saturación de acidez, permitiendo al área pasar de clase IV a clase II.

El porcentaje de saturación de acidez obtenido para el área A también logró una mejora de un promedio de 61,1% baja a 39,0%, permitiendo que la clase de capacidad de uso pase de VI a IV.

Es importante destacar que, para el primer análisis de suelo, anteriormente el sitio ya había sido mecanizado y encalado una vez con carbonato de calcio. No obstante, se ubicó en una clase de capacidad de uso menor a la clase determinada para el área B en el 2017, evaluada en el momento donde ninguna mejora se aplicó en el suelo.

El registro de la fertilidad de los suelos cobra gran importancia en los sistemas de producción agrícolas y forestales, ya que lo que se obtenga dependerá de la capacidad que tenga el suelo [40].

La metodología establecida en el decreto da paso a una planificación conservacionista de la finca, en la cual se debe determinar las limitaciones de los sitios de la finca para identificar las necesidades potenciales productivas y técnicas [8], [47]. A futuro, se busca que exista un ordenamiento de las tierras y no se genere explotación o sobreuso en las mismas, sino que exista una cultura conservacionista que implemente prácticas de manejo el suelo que permitan la mejora del suelo de los sitios.

Cuadro 4. Cuadro de campo comparativo de la determinación de la clase de capacidad de uso del suelo del SAF, para mayo 2018 y octubre 2020, para el área A, San Carlos, Pital, Costa Rica.

Año		2018			2020		
Factor	Limitantes	Parámetros	Categoría	Clase	Parámetros	Categoría	Clase
Erosión	Pendiente (e ₁)		Ligeramente ondulada	II		Ligeramente ondulada	II
	Erosión activa (e ₂)		Ligera	II		Ligera	II
Suelo	Profundidad efectiva (s ₁)	> 120 cm	Muy profundo	I	> 120 cm	Muy profundo	I
	Textura 0-20 cm (s ₂)	(A) <60%	Fina	II	(A) <60%	Fina	II
	Textura 20-40 cm (s ₂)	(A) <60%	Fina	II	(A) <60%	Fina	II
	Pedregosidad (s ₃)		Nula	I		Nula	I
	Fertilidad (s ₄)		Muy baja	VI		Baja	IV
	Toxicidad de cobre (s ₅)		Nula	I		Nula	I
	Salinidad (s ₆)		Nula	I		Nula	I
Drenaje	Drenaje (d ₁)		Bueno	I		Bueno	I
	Riesgo de inundación (d ₂)		Nulo	I		Nulo	I
Clima	Zonas de vida (c ₁)		bmh-P	II		bmh-P	II
	Periodo seco (c ₂)	Sps	Ausente	II	Sps	Ausente	II
	Neblina (c ₃)		Ausente	I		Ausente	I
	Viento (c ₄)		Moderado	II		Moderado	II

*sps= sin periodo seco [46], A=Arcilla.

Cuadro 5. Cuadro de campo comparativo de la determinación de la clase de capacidad de uso del suelo del SAF, para junio 2017 y octubre 2020, para el área B, San Carlos, Pital, Costa Rica.

Año		2017			2020		
Factor	Limitantes	Parámetros	Categoría	Clase	Parámetros	Categoría	Clase
Erosión	Pendiente (e ₁)		Ligeramente ondulada	II		Ligeramente ondulada	II
	Erosión activa (e ₂)		Ligera	II		Ligera	II
Suelo	Profundidad efectiva (s ₁)	> 120 cm	Muy profundo	I	> 120 cm	Muy profundo	I
	Textura 0-20 cm (s ₂)	(A) <60%	Fina	II	(A) <60%	Fina	II
	Textura 20-40 cm (s ₂)	(A) <60%	Fina	II	(A) <60%	Fina	II
	Pedregosidad (s ₃)		Nula	I		Nula	I
	Fertilidad (s ₄)		Baja	IV		Media	II
	Toxicidad de cobre (s ₅)		Nula	I		Nula	I
	Salinidad (s ₆)		Nula	I		Nula	I
Drenaje	Drenaje (d ₁)		Bueno	I		Bueno	I
	Riesgo de inundación (d ₂)		Nulo	I		Nulo	I
Clima	Zonas de vida (c ₁)		bmh-P	II		bmh-P	II
	Periodo seco (c ₂)	sps	Ausente	II	sps	Ausente	II
	Neblina (c ₃)		Ausente	I		Ausente	I
	Viento (c ₄)		Moderado	II		Moderado	II

*sps= sin periodo seco [46], A=Arcilla.

CONCLUSIONES

1. En un periodo de 30 meses, el sistema taungya establecido con melina, yuca y cúrcuma, junto con las enmiendas han logrado mejorar propiedades químicas del suelo como la acidez y SA%.
2. La aplicación de enmiendas en el suelo también permite el mejoramiento de las propiedades químicas del suelo.
3. En un periodo de 30 meses, para un sitio dedicado con anterioridad a la actividad piñera, se logró mejorar la clase de capacidad de uso del suelo de una clase VI a una clase IV.
4. En un periodo de 30 meses, para un sitio dedicado con anterioridad a potrero, se logró mejorar la clase de capacidad de uso del suelo de una clase IV a una clase II.

RECOMENDACIONES

1. Se debe continuar el análisis del contenido de materia orgánica para determinar si logra una estabilización de su valor en el tiempo.
2. La fertilidad de los suelos no se toma en cuenta en el valor de una propiedad o en su plusvalía; sin embargo, una mejora de clase influye de manera positiva en la capacidad de producción de sitio si mantiene la tendencia en el tiempo.

REFERENCIAS

- [1] N. Brady y R. Weil, “The soil around us”, en *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed., Pearson Education, 2017, pp. 1–32.
- [2] FAO, *Agroforesteria para la restauración del paisaje*. Roma, 2017.
- [3] B. B. Lin, “Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change”, *Bioscience*, vol. 61, núm. 3, pp. 183–193, 2011, doi: 10.1525/bio.2011.61.3.4.
- [4] Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI), *Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de Tierras en Costa Rica*, 2a ed. San José, Costa Rica: MINAE, CADETI, 2004.
- [5] F. Bertsch, “El recurso tierra en Costa Rica”, *Agron. Costarric.*, vol. 30, núm. 1, pp. 133–156, 2006.
- [6] F. Montoya, “Degradación y rehabilitación de ecosistemas terrestres: estado de la cuestión”, *Rev. Biocenosis*, vol. 19, núm. 2, p. 25, 2005.
- [7] B. Lundgren y P. K. R. Nair, *Agroforestry for soil conservation*. Nairobi: ICRAF, 1989.
- [8] Decreto Ejecutivo N° 41960-MAG-MINAE, *Establecimiento de la Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras Agroecológicas de Costa Rica*. Costa Rica: La Gaceta N°215, 2019.
- [9] K. A. Borden *et al.*, “Soil texture moderates root functional traits in agroforestry systems across a climatic gradient”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 295, núm. September 2019, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1016/j.agee.2020.106915.
- [10] D. Celentano *et al.*, “Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil”, *Agrofor. Syst.*, vol. 4,

núm. 12, 2020, doi: 10.1007/s10457-020-00496-4.

- [11] K. Arauz-Vásquez, “Contribución de los sistemas agroforestales a la sostenibilidad del servicio ecosistémico hídrico en las cuencas de Costa Rica”, *Rev. AgroInnovación en el Trópico Húmedo*, vol. 1, núm. 1, pp. 78–84, 2018, doi: 10.18860/rath.v1i1.3932.
- [12] FAO, *Agricultura climáticamente inteligente*. Roma, 2010.
- [13] N°7575, *Ley Forestal*. Costa Rica: La Gaceta N°72, 1996.
- [14] C. Reiche, “Promoción de sistemas agroforestales en América Central”, *Rev. For. Centroam.*, vol. 3, núm. 8, pp. 18–25, 1994.
- [15] S. Marinari, R. Mancinelli, E. Campiglia, y S. Grego, “Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy”, *Ecol. Indic.*, vol. 6, núm. 4, pp. 701–711, 2006, doi: 10.1016/j.ecolind.2005.08.029.
- [16] M. R. Guariguata y R. Ostertag, “Neotropical secondary forest succession: Changes in structural and functional characteristics”, *For. Ecol. Manage.*, vol. 148, núm. 1–3, pp. 185–206, 2001, doi: 10.1016/S0378-1127(00)00535-1.
- [17] P. K. R. Nair, *An Introduction to Agroforestry*, 1a ed. Springer Netherlands, 1993.
- [18] J. O. Azeez, “Recycling organic waste in managed tropical forest ecosystems: effects of arboreal litter types on soil chemical properties in Abeokuta, southwestern Nigeria”, *J. For. Res.*, vol. 30, núm. 5, pp. 1903–1911, 2019, doi: 10.1007/s11676-018-0753-z.
- [19] M. R. Rao, P. K. R. Nair, y C. K. Ong, “Biophysical interactions in tropical agroforestry systems”, *Agrofor. Syst.*, vol. 38, núm. 1–3, pp. 3–50, 1998, doi: 10.1007/978-94-015-9008-2_1.

- [20] J. Dollinger y J. Shibu, "Agroforestry for soil health", *Agrofor. Syst.*, vol. 92, núm. 2, pp. 213–219, 2018, doi: 10.1007/s10457-018-0223-9.
- [21] A. Barrantes y S. Ugalde, *Usos y aportes de la madera en Costa Rica Estadísticas 2019 & Precios 2020*. San José, Costa Rica, 2020.
- [22] H. Martínez, "Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo 'Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono'", p. 93, 2015.
- [23] R. Moya Roque, "Gmelina arborea en Costa Rica", *Bois Forêts Des Trop.*, vol. 1, núm. 279, pp. 47–57, 2004.
- [24] INDER, "Informe de Caracterización Básica. Territorio San Carlos-Peñas Blancas-Río Cuarto", p. 103, 2015.
- [25] E. Ortiz y C. Soto, "Atlas digital de Costa Rica". Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2008.
- [26] R. Quesada Monge, "Los Bosques de Costa Rica", *IX Congr. Nac. Ciencias Explor. fuera y dentro del Aula*, núm. 1982, pp. 1–16, 2007.
- [27] F. Magdoff, "Soil Organic Matter Fractions and Implications for Interpreting Organic Matter Tests", núm. 46, pp. 11–19, 1996, doi: 10.2136/sssaspecpub46.c2.
- [28] S. J. Thein, "A Flow Diagram for Teaching Texture-by-feel analysis", *J. Agron. Educ.*, vol. 8, pp. 54–55, 1979.
- [29] E. Esquivel-Segura, "Descomposición de la hojarasca en la Finca Pital", ene-2020.
- [30] E. Veldkamp *et al.*, "Soil research challenges in response to emerging agricultural soil management practices", *Adv. Agron.*, pp. 1–62, 2020, doi:

10.1016/bs.agron.2020.01.002.

- [31] E. K. Bünemann *et al.*, “Soil quality - A critical review”, *Soil Biol. Biochem.*, vol. 120, núm. February, pp. 105–125, 2018, doi: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
- [32] FAO, *Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto*, Organizaci. Roma, Italia: FAO, 2017.
- [33] A. van der Wal y W. de Boer, “Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition”, *Soil Biol. Biochem.*, vol. 105, pp. 45–48, 2017, doi: 10.1016/j.soilbio.2016.11.006.
- [34] P. Pardon *et al.*, “Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 247, núm. June, pp. 98–111, 2017, doi: 10.1016/j.agee.2017.06.018.
- [35] E. Molina y G. Meléndez, “Tabla de interpretación de análisis de suelos”, 2002.
- [36] J. Calvo, “Zonificación de plantaciones de Gmelina arborea afectadas por *Nectria* sp. en relación con condiciones de suelo, clima y manejo en la Zona Huetar Caribe”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018.
- [37] W. Navarro-Valladares, “Comparación y evaluación de las propiedades físicas y químicas en suelos bajo diferentes combinaciones de especies forestales nativas, en la Virgen de Sarapiquí, Costa Rica”, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [38] R. Rodríguez Peraza, “Características edáficas de cinco sitios de la Zona Sur de Costa Rica con presencia abundante de la especie *Platymiscium pinnatum* (Jacq.) Dugand. (Cristóbal)”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018.
- [39] E. Esquivel-Segura y M. Guevara, “Encalado: una opción para el mejoramiento de la productividad forestal”, *Rev. Germinar*, vol. 9, núm. 26, pp. 15–16, 2019.

- [40] J. C. Méndez y F. Bertsch, “El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica : Estado actual y principales cambios en el tiempo”, *Inf. Agronómicas Latinoamérica*, vol. 8, pp. 27–33, 2012.
- [41] A. Alvarado y J. Raignosa, *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*, 1a ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 2012.
- [42] E. A. Esquivel-Segura *et al.*, “Potasio y Boro en plantaciones dendroenergéticas, en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile”, *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 14, núm. 34, pp. 27–36, 2017, doi: 10.18845/rfmk.v14i34.2998.
- [43] I. N. de I. y T. en T. Agropecuaria, *Manual Del Cultivo De Yuca (Manihot esculenta Crantz)*. San José, Costa Rica: INTA, 2017.
- [44] C. M. Ramírez-Mesén, “Uso de un vehículo aéreo no tripulado como alternativa para evaluar el estado nutricional de una plantación de Gmelina arborea Roxb, San Carlos, Costa Rica”, Tecnológico de Costa Rica, 2019.
- [45] N. V. Hue, S. Vega, y J. A. Silva, “Manganese Toxicity in a Hawaiian Oxisol Affected by Soil pH and Organic Amendments”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 65, núm. 1, pp. 153–160, 2001, doi: 10.2136/sssaj2001.651153x.
- [46] J. Solano y R. Villalobos, “Aspectos Fisiográficos aplicados a un Bosquejo de Regionalización Geográfico Climático de Costa Rica”, *Top. Meteor. Ocean.*, vol. 8, núm. 1, pp. 26–39, 2001.
- [47] J. Nuñez Solís, “Clasificación de tierras”, en *Manejo y conservación de suelos*, 1era ed., San José, Costa Rica: EUNED, 2010, pp. 138–184.