

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

*“Caracterización del suelo en el parche boscoso
de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA)”*

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como
requisito para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Josué Mora Chacón

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José. Costa Rica

2019

Este trabajo final de graduación fue sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Carlos Rojas Alvarado, Ph.D.

Director de Tesis



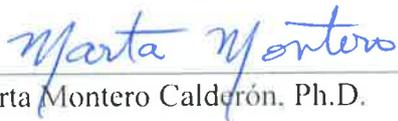
Geovanni Carmona Villalobos, Lic.

Miembro, Equipo Asesor



María Araya Vargas, M.Sc.

Miembro, Equipo Asesor



Marta Montero Calderón, Ph.D.

Miembro. Tribunal Examinador



Marianela Alfaro Santamaría, Ph.D.

Miembro. Tribunal Examinador



Josué Mora Chacón.

Estudiante

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por ayudarme a finalizar este proceso, y en especial a la que siempre estaba ahí, mi base, mi fortaleza, mis ganas de luchar, la que es todo para mí, mi madre, por enseñarme a que siempre hay que seguir adelante sin importar las situaciones.

A mi hermana y hermanos, por ese apoyo durante estos años, sin ustedes no lo hubiera logrado, y a mi abuelo que está en el cielo, por transmitirme esa humildad y fortaleza para alcanzar las metas que uno se propone en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Rojas Alvarado, quién me apoyó desde un inicio para que se llevara a cabo la culminación de este proyecto, por su constante ayuda en este largo proceso, por su dirección, corrección de manuscritos, apoyo científico y siempre estar ahí, gracias.

Al Sr. Pedro Rojas por su gran apoyo en campo, ayuda en el laboratorio y asesoría de uso de equipo, por su gran parte humana que siempre me transmitió durante el proceso, por ese carisma que demostraba y la disposición de siempre ayudar sin importar la situación, gracias.

A los lectores Lic. Geovanni Carmona Villalobos y M.Sc. María Araya Vargas, por su apoyo, asesoría, correcciones y observaciones durante la elaboración del proyecto.

A la Unidad de Recursos Forestales por permitirme llevar a cabo las pruebas necesarias para obtener los resultados, también a la integrante del laboratorio de REFORESTA M.Sc Karina Rodríguez por su ayuda en las pruebas de respiración del suelo. Al Departamento de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos de la Sede del Atlántico de la UCR, por permitirme llevar a cabo el proyecto en esa área.

Por último, a los compañeros que siempre estaban ahí, apoyando en las buenas y en las malas durante este proceso de formación, por esa amistad, por enseñarme a ser mejor persona, por esas trasnochadas, siempre estaré ahí, muchas gracias.

RESUMEN

En este trabajo se ha planificado documentar de manera general las condiciones físico-químicas, biológicas del suelo y el índice de sismicidad del lugar. Esto ante la necesidad existente en la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA), en la Suiza, Turrialba Costa Rica, de evaluar dichas propiedades como una manera de apoyar los esfuerzos de investigación que se realizan en la zona de estudio. Para ello se trabajó en los tres sistemas de uso del suelo presentes en la misma (agricultura, ganadería y bosque). Se realizó una cuadrícula inicial georreferenciada de 45 puntos en un total de 39 ha, que sirvió de base para la creación de registros visuales correspondientes a las variables de estudio. Las pruebas físicas de suelo, estudiadas en una profundidad de 0-20 cm, correspondieron con 1) textura usando la metodología del Laboratorio de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, 2) color a partir de la Tabla Munsell, 3) densidad aparente y porosidad con la prueba del cilindro del volumen conocido y el horno. La prueba de infiltración con el método de Porchet se realizó a una profundidad de 0-30 cm y para las pruebas químicas a una profundidad de 0-15 cm, en un total de 45 puntos de muestreo y se evaluaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas, utilizando la solución extractora KCl- Olsen modificado. Finalmente, para evaluar la dinámica biológica del suelo se estudiaron 1) la respiración del suelo y 2) la incidencia de micetozoos (microorganismos conocidos como mixomicetos y dictiostélidos). Estas últimas variables fueron realizadas en el Laboratorio de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones en Ingeniería a partir de seis muestras espacialmente distribuidas en la sección de bosque de la finca.

La textura del suelo en toda el área de estudio se clasificó en clase media y gruesa, con gran influencia en las propiedades hídricas del suelo. Se encontraron seis colores del suelo y esta variable parece haber sido afectada por la zonificación existente en la finca. La densidad aparente se encontró en un rango entre 0.6-1.4 g/cm³, considerado ideal, además para la porosidad se obtuvieron tres categorías (media, alta y muy alta) y fueron influenciadas por la textura y el uso del suelo en los puntos de muestreo. Para infiltración se obtuvieron tres categorías (moderadamente lenta, moderada y moderadamente rápida) con diferencias significativas de acuerdo con la textura y al uso del suelo. A partir de los elementos químicos se encontró que toda el área evaluada estaba en un rango de fertilidad medio a alto. Las pruebas biológicas mostraron biodiversidad media y alta en el bosque con un promedio de respiración del suelo de 46.33 µg C-CO₂/gh. Finalmente, el riesgo a deslizamiento se determinó como de muy bajo a bajo, lo cual demuestra poca vulnerabilidad en la finca. Todo lo anterior demuestra, que a pesar de que los suelos son heterogéneos a nivel superficial, tanto las propiedades físicas y químicas existentes en el bosque de FEIMA, permiten que se desarrolle un ecosistema saludable, lo cual se observó a partir de los indicadores biológicos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE CUADROS	11
NOMENCLATURA	14
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Antecedentes de la investigación	19
2.2 Definición del suelo	20
2.3 Factores formadores del suelo.....	22
2.4 Propiedades físicas	23
2.4.1 Textura del suelo	24
2.4.2 Densidad aparente	25
2.4.3 Porosidad	26
2.5 Propiedades químicas.....	26
2.6 Microorganismos en el suelo	27
2.7 Levantamiento de suelo.....	27
2.8 Mapas digitales.....	28
2.9 Grado de susceptibilidad a deslizamientos	28
2.10 Objetivos	29
Objetivo general.	29
Objetivos específicos.....	29
3. METODOLOGÍA.....	31
Descripción del área de estudio.....	31
Generación de mapas digitales	32
Muestreo de suelo.....	33
Análisis de suelo.....	34
Textura	35
Color.....	36

Propiedades químicas.....	36
Porosidad.....	38
Infiltración.....	40
Respiración del suelo	41
Microorganismos (micetozoos).....	43
Mapa de susceptibilidad a deslizamientos	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1 Conclusiones	69
5.2 Recomendaciones.....	70
6. REFERENCIAS	73
ANEXOS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colocación de marcas en los centroides de las cuadrículas de FEIMA durante la fase de planeamiento de este proyecto.....	33
Figura 2. Zonificación de FEIMA, a partir de los usos del suelo presentes en el área.....	34
Figura 3. Deposición de sedimentos correspondientes a una muestra experimental durante la prueba de las clases texturales de los suelos de FEIMA.....	35
Figura 4. Imagen del suelo en la sección de potreros de FEIMA tras la extracción de la muestra con barreno para la realización de pruebas químicas.....	37
Figura 5. Extracción de suelo con el método de volumen conocido, para las pruebas de densidad aparente de las muestras de FEIMA.....	39
Figura 6. Muestras de suelo de FEIMA en el proceso de secado durante la determinación de la densidad aparente.....	40
Figura 7. Esquema mostrando el agujero cilíndrico del modelo Porchet, utilizado para obtener la infiltración del suelo.....	40
Figura 8. Agujero cilíndrico del modelo Porchet para medir la infiltración, implementado en FEIMA.....	41
Figura 9. Muestras de suelo (fondo del recipiente) durante la prueba de respiración de suelo. Se puede observar el beaker con NaOH de concentración conocida.....	42
Figura 10. Sorocarpos de dictiostélidos obtenidos en cultivos de suelo durante la prueba de incidencia de microorganismos.....	44
Figura 11. Distribución de frecuencias absolutas según clases texturales de suelo en la capa superficial en FEIMA (n=45).....	47
Figura 12. . Parámetros de humedad del suelo, de acuerdo con las clases texturales de las 45 muestras de FEIMA.....	48
Figura 13. Mapas de la caracterización primaria llevada a cabo en toda la finca: (a) Textura, (b) Color, (c) Fertilidad.....	55
Figura 14. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada (IA) observados en un punto de muestreo en FEIMA con uso de suelo dedicado a la ganadería.....	58

Figura 15. Velocidad de infiltración observada en dos puntos de muestreo asociados con dos clases texturales y tipos de uso de suelo en FEIMA.....	60
Figura 16. Mapas de la caracterización secundaria llevada a cabo en toda la finca: (a) Porosidad, (b) Infiltración.....	61
Figura 17. Mapa de la caracterización secundaria llevada a cabo en el parche boscoso: a) Respiración del Suelo, b) Mixomicetos.....	64
Figura 18. Mapa del Potencial de Deslizamiento en toda la finca.....	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Categorización por tamaño de las partículas del suelo.	25
Cuadro 2. Grupos de las propiedades químicas del suelo, para el análisis de fertilidad.	38
Cuadro 3. Parámetros estadísticos del porcentaje de arena, limo y arcilla, de acuerdo al uso de suelo en FEIMA a 20 cm de profundidad en FEIMA (n=45).	46
Cuadro 4. Área (en ha) asociada con las clases texturales y la zona de trabajo en FEIMA según los resultados del presente estudio.	49
Cuadro 5. Distribución porcentual de las muestras de suelo analizadas en este estudio según color definido por el sistema de notación Munsell.	50
Cuadro 6. Cantidad de muestras del suelo en FEIMA, distribuidas según los parámetros de acidez y Bases y su respectiva categoría.	51
Cuadro 7. Parámetros estadísticos de la porosidad de acuerdo con el uso y la textura del suelo, en FEIMA (n=45).	57
Cuadro 8. Distribución del área (en ha) asociada con las categorías de porosidad y zonas de uso del suelo en FEIMA.	58
Cuadro 9. Parámetros estadísticos de infiltración (cm/h) de acuerdo con el uso y la textura del suelo en FEIMA (n=8).	60
Cuadro 10. Parámetros estadísticos de la respiración del suelo $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$ según lugar de muestreo dentro del parche boscoso de FEIMA (n=18).	63
Cuadro 11. Número de especies de mixomicetes registrados en FEIMA según zona dentro del parche boscoso(n=72).	63
Cuadro 12. Factores pasivos del índice de susceptibilidad a deslizamiento en FEIMA de la UCR en el Cantón de Turrialba, Costa Rica.	66
Cuadro 13. Factores activos del índice de susceptibilidad a deslizamiento en FEIMA de la UCR en el Cantón de Turrialba, Costa Rica.	67
Cuadro 14. Esquema de selección del tipo de mapa de suelos según su escala.	83
Cuadro 15. Resultados del porcentaje de arena, limo, arcilla y las clases texturales en las diferentes parcelas de FEIMA.	84

Cuadro 16. Resultados del color de suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.....	86
Cuadro 17. Resultados de los parámetros de acidez del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.	87
Cuadro 18. Resultados de las bases del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.....	88
Cuadro 19. Resultados de las relaciones catiónicas del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.	90
Cuadro 20. Resultados del P y micronutrientes del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.	91
Cuadro 21. Resultados de la densidad aparente y porosidad del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.	92
Cuadro 22. Resultados de infiltración del suelo en cuatro parcelas de FEIMA.	94
Cuadro 23. Resultados de respiración del suelo en seis parcelas del bosque de FEIMA.	94
Cuadro 24. Resultados de microorganismos en el suelo en cinco parcelas del bosque de FEIMA.	95
Cuadro 25. . Resultados de las propiedades de humedad del suelo en FEIMA.....	95
Cuadro 26. Niveles críticos generales y condiciones medias, altas y anormales para interpretar el análisis de fertilidad de suelos (valores en negrita pueden ser problemáticos de acuerdo a la variable).	97
Cuadro 27. Interpretación general de los niveles crítico, medio y alto en el análisis de fertilidad de suelos.	98
Cuadro 28. Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con características del lugar de estudio.	98
Cuadro 29. Clasificación del parámetro de susceptibilidad litológica de acuerdo con las características físico-mecánicas típicas	100
Cuadro 30. Clasificación del parámetro pendiente, con respecto a las condiciones de terreno	102
Cuadro 31. Clasificación de las precipitaciones promedio mensual, de acuerdo con los valores asignados	103

Cuadro 32. Factor humedad del suelo (Ph), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada.	103
Cuadro 33. Parámetro de sismicidad (Ds), basado en el evento de 100 años en la escala MM respecto a la intensidad.	104
Cuadro 34. Parámetro de lluvia máxima (Dll), para un periodo de retorno de 100 años. ..	105
Cuadro 35. Clasificación del índice de susceptibilidad y su potencial de deslizamiento...	105
Cuadro 36. Valores porcentuales de CC, PMP y CRAD, de acuerdo a la clase textural del suelo.	106

NOMENCLATURA

CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas
USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
FEIMA: Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos
ISSS: Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo
BSI: Instituto Británico de Estándares
DIN: Instituto Alemán de Estándares
IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
MMV: Metodología Mora Varhson
SIG: Sistema de Información Geográfica
UCR: Universidad de Costa Rica
ACCS: Asociación Costarricense de Ciencia del Suelo
INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
INII: Instituto de Investigaciones en Ingeniería
INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos
REFORESTA: Unidad de Recurso Forestales
ITCR: Instituto Tecnológico de Costa Rica
MED: Modelo de Elevación Digital
CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
PGA: Aceleración Sísmica
AA: Área Agrícola
BF: Bosque Frente
BM: Bosque Medio
BA: Bosque Atrás
AG: Área Ganadería
CC: Capacidad de Campo
PMP: Punto de Marchitez Permanente

MO: Materia Orgánica del suelo

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico

NRCS: Servicio de Conservación de Recursos Naturales

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

1. INTRODUCCIÓN

El suelo constituye uno de los recursos más importantes para la subsistencia humana en el planeta ya que representa la base fundamental para la producción agrícola, forestal y agropecuaria. Este sistema se ha formado al pasar los años por un proceso complejo que implica cambios físicos, químicos y biológicos de la roca originaria, y que en su forma actual permite el desarrollo de plantas. Generalmente la disgregación de las partículas minerales de las rocas es provocada por la acción del agua, el oxígeno, el dióxido de carbono y los compuestos orgánicos [1]. De forma similar, la disminución del tamaño de las partículas sin ninguna modificación en su composición es causada por la lluvia y el hielo-deshielo, entre otros [1]. A su vez, la comunidad de organismos que habita la matriz del suelo, facilita la degradación y el aporte de materia orgánica, la producción del CO₂ por medio de la respiración, y el fraccionamiento de las rocas por las raíces y demás [1].

De esta forma, el suelo se puede considerar como una matriz de factores multidimensionales que a su vez muestra patrones heterogéneos. Lo anterior es prominente en suelos forestales, debido a que la vegetación que se encuentra sobre el suelo juega un papel importante para establecer la naturaleza y las propiedades del mismo. Una vez que la vegetación se descompone, altera la estructura y función del ecosistema y se perturba principalmente el horizonte superficial [2]. Igualmente, debido a que el suelo se encuentra formado por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) y está conformado por una serie de horizontes con características físicas y químicas particulares, sus propiedades son diferentes a distintas profundidades [3].

Generalmente, cuando se habla de suelos en condiciones de uso de bosque, es importante mencionar características de este tipo de cobertura en Costa Rica. Un bosque es considerado como tal cuando presenta un área de terreno mínima de 1 ha, con un dosel de más del 30 %. Los árboles deben presentar una altura de 5 m en su madurez in situ. Del mismo modo, este ecosistema puede ser nativo o intervenido con formaciones cerradas en las que los árboles de varias estratificaciones y sotobosque cubren gran cantidad de terreno [4]. A nivel de gestión de bosques es importante caracterizarlos ya que, aquellos que se encuentren en un régimen sostenible brindan al ser humano recursos y servicios ecosistémicos de importancia, siendo base fundamental en el ámbito de sostenibilidad. De esta forma, conocer la condición en la que se encuentren los bosques y su suelo, permite tomar decisiones en temas de desarrollo sostenible, inversión y políticas de conservación [5].

Cuando se realiza una gestión de bosques, las variables edáficas son de suma importancia, y es necesario hacer un levantamiento de ellas. La densidad aparente, la fertilidad a partir de indicadores químicos y la cantidad de materia orgánica son determinantes en este proceso [5]. Lo anterior, permite conocer la calidad del suelo y los beneficios directos que este le brinda al desarrollo del parche boscoso, permitiendo un biosistema en equilibrio. De esta manera, el suelo es el medio por el cual el bosque mantiene su salud y se integra en un sistema de beneficio mutuo, ya que la cobertura boscosa mantiene la compactación y la erosión del suelo en rangos mínimos. Además, la fertilidad, humedad, temperatura y materia orgánica del suelo se mantiene en rangos óptimos para el progreso del sistema en general [6].

Debido a lo anterior es importante realizar una adecuada descripción del suelo y de la distribución espacial de sus características. Esto sirve como base para la clasificación de estos y para la evaluación posterior de cambios a través del tiempo. Una buena descripción del suelo puede ayudar a prevenir errores en el esquema de muestreo de proyectos que involucren este sistema [7] y facilita una adecuada planificación del uso de la tierra.

Debido a una necesidad de caracterizar el suelo en la sección de bosque de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) de la UCR, se ha diseñado el presente proyecto. La idea ha sido seguir los lineamientos establecidos a nivel nacional [8] y con ello crear mapas digitales de suelo de esta finca. Así, no solamente se ha apoyado el proceso de investigación que se ha iniciado en esta zona, sino que se ha aportado desde la perspectiva de Ingeniería de Biosistemas a la caracterización del sistema boscoso por estudiar. Es así que, a partir de la determinación de una serie de condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo en el área boscosa de esta finca, se han creado mapas digitales y se ha llevado a cabo un análisis de la distribución espacial de estas variables. Dentro del contexto de adaptación al cambio climático, seguridad alimentaria y planificación nacional, la anterior tarea es relevante y correspondía con un objetivo no cumplido hasta el momento en el sitio de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Los suelos han sido de gran importancia en los diferentes sistemas agrícolas y para el desarrollo de las diferentes civilizaciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, a pesar de su trascendencia en la vida del ser humano, no ha sido siempre que los suelos se han estudiado con un enfoque científico. Existen razones suficientes para pensar que cualquier avance que se realice en el conocimiento general de los suelos, ayudará de manera eficiente en el panorama de las actividades agrícolas, forestales, agropecuarias e ingenieriles [9].

Este conocimiento se plasma en forma de artículos científicos, libros o páginas web de individuos o instituciones que se encargan de registrar, ordenar y divulgar información sobre la ciencia del suelo. Actualmente en Costa Rica se encuentra el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), dedicado especialmente a estudiar las variaciones espaciales de las diferentes características físicas, químicas y biológicas que constituyen el suelo. Esta dependencia de la Universidad de Costa Rica (UCR) desarrolla además mapas nacionales que contemplan los tipos de suelos presentes en el país. Este proceso es desarrollado en conjunto con instituciones internacionales como el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), con la finalidad de tener clasificaciones con características generales. Partiendo de lo anterior, el presente trabajo ha sido planificado para documentar de manera específica las condiciones de los suelos en la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA). Lo anterior ha sido llevado a cabo a través de la

recolección de datos físicos, químicos y biológicos, su posterior interpretación y representación visual.

2.2 Definición del suelo

La definición del suelo responde al interés, punto de vista y época asociados con el individuo o institución que realice la misma. De esta manera, el concepto de suelo puede comprender desde niveles básicos como un sitio óptimo para sembrar las semillas y cosechar sus productos (concepto de un agricultor), hasta niveles complejos con integración de elementos de ecología, geología y química (concepto científico) pasando por un nivel ingenieril que gira alrededor de su utilización y manejo. Es así, como debido a la variedad de criterios para un mismo término, diferentes autores tratan de unificar definiciones que acierten la aplicación de este. A partir de lo anterior surgen los siguientes dos enfoques

Pedología: el suelo es considerado como un cuerpo natural, cuyas propiedades interesan para establecer su origen y clasificación, sin importar su capacidad de uso [10].

Edafología: el suelo es tomado desde un punto de vista del desarrollo de las plantas, es decir, desde un enfoque más práctico, direccionado a obtener los mejores rendimientos agropecuarios posibles [10].

El Manual de Levantamiento de Suelos define el suelo como “una colección de cuerpos naturales en una superficie terrestre, en algunos sitios modificados o aun hechos por el hombre, que contienen materia viviente y que soportan o son capaces de soportar plantas

creciendo al aire libre” [11]. Esta definición hace referencia a lo importante de conocer diferentes propiedades del suelo y su relación con la variabilidad en la capacidad de uso

Los suelos, a nivel superficial, tienden a ser modificados por el uso. En algunos estudios [11], se ha visto que suelos de bosques tienen características diferentes a otros suelos con usos distintos como pasto o agrícola. De esta forma, el suelo se puede ver como una capa delgada, de pocos centímetros, de material terroso no consolidado, formado en la interfase atmósfera-biósfera-litosfera. Y sería en esta capa en donde se da la interacción entre los diferentes elementos conformantes y donde se presentan intercambios de materiales, energía, que da como resultado una enorme complejidad [12].

Debido a estos factores es que la calidad del suelo es variable y determinada por los componentes físicos, químicos y biológicos, así como por sus respectivas interacciones [13]. De forma relevante, es precisamente esta salud de la superficie la que permite una adecuada interacción entre la increíble diversidad de organismos, incluyendo microorganismos y animales. Así, generalmente, la biota se concentra en la hojarasca, los primeros centímetros del suelo y a lo largo de las raíces, cumpliendo una función primaria de descomposición de la materia [14].

Partiendo de lo anterior, el suelo es un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas entre la atmósfera que se encuentra encima y los estratos que están debajo, y que además sirve como medio para el crecimiento de las plantas y organismos [15]. Además, el suelo está formado por horizontes, que se distinguen como resultado de pérdidas o adiciones conforme

a su taxonomía y cuyos límites son áreas donde el suelo cambia de acuerdo con la profundidad en zonas estériles y rocas [16].

La mayoría de los cuerpos naturales que se pueden incluir dentro del término “suelo”, tienen la capacidad de soportar plantas. Sin embargo, hay una pequeña parte que no están capacitados para soportar plantas altas y que están limitados por su desarrollo pedogénico, como por ejemplo los suelos de la Antártida. De forma similar, la definición de suelo también envuelve cuerpos naturales que tienen la capacidad de soportar plantas a pesar de que no contienen partes diferenciadas, como por ejemplo los depósitos de aluvión o los rellenos [11].

2.3 Factores formadores del suelo

El suelo que encontramos en cualquier lugar es el resultado de varios factores que trabajan conjuntamente. Así, las variables climáticas que mayor influencia tienen en la formación del suelo son la precipitación, la temperatura y el viento. La evapotranspiración potencial es un factor determinante en la evolución del suelo y se deriva de las anteriores. La pérdida de humedad del suelo en una determinada área está influenciada por esta evaporación y por la pérdida de agua en la planta. Pedogénicamente, las condiciones contrastantes de humedad y sequía favorecen los procesos de translocación en el suelo, mientras que condiciones de humedad permanentes sin saturación ayudan a transformaciones y pérdidas [17].

El material parental determina la línea base del suelo y da origen al mismo a partir de la alteración de las rocas o sedimentos, que se han desplazado desde otros lugares. De esta manera desde el punto de vista de origen estos materiales se han clasificado en tres grandes grupos generales: rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas [18].

Los organismos vivos también afectan la formación natural del suelo e interactúan con otros procesos pedogénicos (p.e. degradación microbiológica de rocas en zonas de alta erosión). Debido a que las plantas crecen en capas superficiales de residuos vegetales y su crecimiento está determinado por la incorporación de carbono atmosférico, este elemento es trasladado al suelo a través de la descomposición de estructuras vegetales (ramas, hojas, tallos y raíces). Consecuentemente, esta materia orgánica, así como el material parental son descompuestos por microorganismos que están presentes en todos los suelos, generalmente en grandes cantidades [19].

Otro elemento importante en la formación de suelos es el relieve (topografía) de un sitio. Este factor se refiere a la configuración de la superficie del suelo y a la geoforma que constituye cualquier componente o rasgo físico de la zona terrestre formado por condiciones naturales. Este conjunto de formas que se encuentran en la superficie de la tierra tiene efectos sobre la formación del suelo debido a que interviene en procesos de erosión por escorrentía asociada con la pendiente, así como en procesos de drenaje, que tienen un efecto en la fertilidad [20]. Finalmente, el tiempo a través del cual ocurre esta interacción tiene como consecuencia una variedad de procesos que dan como resultado las diversas propiedades de suelo [21].

2.4 Propiedades físicas

Generalmente las propiedades físicas y químicas se estudian mediante análisis de laboratorio. Estos estudios forman parte de un sistema de validación de datos en el campo y al mismo tiempo representan un proceso de verificación para observar los posibles límites o zonación de un lugar a través de la elaboración de mapas [22].

La determinación de la capacidad del suelo para la agricultura, usos ambientales, y aplicaciones de ingeniería, están dadas por las propiedades físicas. Es importante conocer el suelo para valorar como las actividades antrópicas pueden modificarlo desde el punto de vista físico, minimizando el impacto negativo a través de la conservación y para observar en qué medida esto influye en el desarrollo de las plantas. Físicamente, el suelo es un medio formado por ductos llamados poros, estructurado por tres fases denominadas sólida (materia orgánica 5%, minerales 45%), líquida (agua 25%) y gaseosa (aire 25%) [23].

2.4.1 Textura del suelo

La textura es la proporción de cada elemento que fija las cantidades relativas en la que se encuentran las partículas menores a 2 mm en el suelo. Dicho de otra manera, la textura representa el porcentaje de los elementos que conforman el suelo, agrupados en tres clases de tamaños denominados arena, limo y arcilla. Es importante mencionar que la textura tiene gran influencia en la retención de humedad y afecta la aireación, el movimiento de agua, la liberación y retención de iones, la disponibilidad de nutrientes, la erodabilidad, el uso y el manejo del suelo [24].

Los parámetros de humedad relacionados, interesantes de obtener a partir de las clases texturales del suelo son la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Marchitez Permanente (PMP) y la Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD). La CC de un suelo, representa la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad, el PMP, se define como la cantidad de agua del suelo, en la que las hojas no crecen

y se marchitan (condición en la que las plantas no se recuperan). La CRAD es la cantidad de agua retenida por el suelo, que puede ser aprovechada por las plantas [25].

En el (Cuadro 1) se muestra la categorización por tamaño de partícula de suelo según varias instituciones internacionales.

Cuadro 1. Categorización por tamaño de las partículas del suelo [23].

Categoría	Rango Diámetro (mm)		
	USDA*	ISSS**	DIN BSI***
Arena	2-0.05	2-0.02	2-0.08
Limo	0.05-0.002	0.02-0.002	0.08-0.002
Arcilla	<0.002	<0.002	<0.002

* Departamento de Agricultura de Estados Unidos

** Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo

*** Instituto Alemán de Estándares y el Instituto Británico de Estándares

2.4.2 Densidad aparente

Existen ciertas propiedades o condiciones como la materia orgánica, la textura, la humedad y las prácticas de uso que influyen en el valor de la densidad del suelo. Se establecen dos tipos, la densidad de las partículas o densidad real que se encuentra definida por la masa de sólidos por unidad de volumen de los sólidos de un suelo y la densidad de volumen o aparente. Esta última expresa la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total (sólidos, agua, aire) [26]. Generalmente, la densidad aparente aumenta con la profundidad, esto debido a pérdida de materia orgánica y a la presión que ejercen las capas superiores. La importancia de esta variable es que permite conocer situaciones de compactación del suelo (p.e. por maquinaria agrícola) [27]. Además, es muy útil cuando se desea conocer las siguientes propiedades del suelo:

- Calcular la masa de un determinado volumen de suelo.
- Transformar el contenido de humedad gravimétrico del suelo a contenido volumétrico
- Calcular la porosidad total del suelo, conociendo la densidad real.

2.4.3 Porosidad

Esta propiedad depende del arreglo y la composición de la parte sólida, contemplando elementos como la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura. Es así como se definen dos espacios porosos:

- Microporosidad o porosidad textural: formada por los poros más finos.
- Macroporosidad o porosidad estructural: compuesta por los poros grandes del suelo.

Conocer la proporción en la que se encuentran los diferentes tamaños de los ductos del suelo es importante ya que controlan las relaciones entre la fase sólida, líquida y gaseosa. Lo anterior influye de manera directa en el drenaje, la infiltración, el almacenamiento de agua, la aireación y la temperatura [28].

2.5 Propiedades químicas

La química del suelo afecta en gran medida muchas reacciones y procesos en el ambiente que se desarrollan fundamentalmente bajo los principios de las soluciones homogéneas. Además, estudia la composición, propiedades y reacciones químicas utilizadas para resolver problemas relacionados con la dinámica de los nutrientes vegetales y con la fertilidad del suelo. Al igual que las propiedades físicas y biológicas los indicadores químicos son susceptibles al manejo y uso del suelo. Los principales cationes que se encuentran en el suelo,

en orden creciente de magnitud de carga, son: H^+ , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Si^{4+} [29].

2.6 Microorganismos en el suelo

Los organismos del suelo se clasifican en macrofauna, mesofauna, y microfauna y actúan sobre el suelo modificando su composición, su estructura y funcionamiento. Estos organismos vivos del suelo mejoran el ingreso y almacenamiento de agua, la resistencia a la erosión, la nutrición de plantas, y la descomposición de materia orgánica. El uso del suelo, el control fitosanitario y las buenas prácticas agrícolas en siembra y cosecha influyen en el tamaño de la población y su interacción con el suelo. Los microorganismos actúan en una buena cantidad de procesos y reacciones que tienen que ver con la nutrición vegetal. También intervienen activamente y de forma directa en ciclos geoquímicos como el del C, N, P y el S [30].

2.7 Levantamiento de suelo

El levantamiento es el proceso de determinación del patrón de distribución de suelos y responde a las necesidades que quieran ser estudiadas. Este elemento corresponde a una serie de pronósticos o acciones que se llevan a cabo en un área determinada para caracterizar, clasificar, delimitar y representar los diferentes suelos presentes [31]. Debido a que no siempre es necesario conocer los suelos con el mismo grado de detalle es que surge la necesidad de diseñar diferentes tipos de levantamientos. Algunos de estos pueden denominarse muy detallado, detallado, semidetallado, general, exploratorio y esquemático. Cada uno responde a las circunstancias y paisaje que se presente en el área de estudio. Sin

embargo, todos apuntan en la dirección de caracterizar, delimitar, clasificar y representar los diferentes suelos de una región a través de un mapa.

2.8 Mapas digitales

En Costa Rica existen organizaciones encargadas de generar mapas digitales de suelos como el CIA de la UCR y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). El registro visual es una resolución gráfica del suelo que muestra sus relaciones cuantitativas respecto a estudios de campo y de laboratorio. Para llevarlo a cabo es importante la dependencia de conceptos como la base de datos georreferenciada, la escala a utilizar, el tipo de levantamiento, el uso de sistemas de información geográfica y por supuesto la variable principal de estudio (el suelo) [22].

El mapeo de suelos es el proceso de agrupar los cuerpos naturales de los suelos en unidades de mapa, mediante la utilización de información de las propiedades registradas. Posteriormente esta información es analizada e interpretada, con el fin de representar la distribución de forma espacial en un mapa. En la elaboración de la representación visual del suelo es importante considerar que la metodología varía entre países. El sistema de referencia que se utiliza en Costa Rica es el de taxonomía de suelos (Soil Taxonomy) del USDA establecido en 1999. Además, se debe considerar una adecuada escala de trabajo del mapa y la unidad mínima de mapeo, (ver Anexo 1), el cual ha sido adaptada de Ligier y SEPSA [22].

2.9 Grado de susceptibilidad a deslizamientos

Existen varios métodos que ayudan a conocer la vulnerabilidad a deslizamientos, como, por ejemplo: el método de Newmark, el método de falla plana, el método detallado de falla

rotacional y el Método de Mora-Vahrson (MMV). El MMV, permite identificar y señalar las zonas con potencial de presentar deslizamientos, basándose en indicadores morfodinámicos. Entre los indicadores se encuentran el relieve, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la lluvia, todo esto definido por índices de influencia por cada área de estudio. Finalmente, lo descrito anteriormente puede ser trabajado mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), para generar un mapa de potencial de deslizamiento [32].

Una de las situaciones más importantes ante cualquier amenaza natural es la toma de decisiones de manera eficiente, para una eventual planificación del uso del terreno, planificación urbana y regional, a través de planes de gestión de riesgos. Es así, como la MMV ha respondido ante esta necesidad, convirtiéndose en un método sencillo, pero aceptablemente preciso para ser utilizado en zonificación de vulnerabilidad por deslizamientos [33].

2.10 Objetivos

Objetivo general.

Determinar una serie de condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo en toda la zona del área boscosa de FEIMA, para la creación de mapas digitales correspondientes a las variables estudiadas como una forma de apoyar los esfuerzos de investigación forestal en esta finca.

Objetivos específicos

Determinar los valores para una serie de variables fisicoquímicas y biológicas para analizar diferencias espaciales en la zona boscosa de FEIMA.

Crear mapas digitales con las diferentes características fisicoquímicas y biológicas del bosque en diferentes zonas del parche boscoso en FEIMA e integrar estas características en mapas de suelos en la misma zona.

Determinar la zonificación de FEIMA de acuerdo con las diferentes características cuantificadas en el presente estudio como una forma de incluir información fisicoquímica, biológica y grado de deslizamiento en el contexto de un análisis de suelos boscosos.

3. METODOLOGÍA

Este proyecto se llevó a cabo entre los años 2018 y 2019 en la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (a partir de ahora, abreviada como FEIMA), en Turrialba, Costa Rica. Originalmente se planteó trabajar únicamente en el parche boscoso de la misma, pero la caracterización final se hizo para todas las zonas de uso del suelo presentes en la finca y el enfoque de análisis se centró en la primera sección. De esta forma, las muestras de suelo para las pruebas químicas, textura, color, porosidad, respiración y microorganismos, se recolectaron en octubre del año 2018. La infiltración se realizó en febrero del año 2019 y las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el CIA y el Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) de la UCR. Los resultados de las variables químicas, color, textura, porosidad, densidad aparente, infiltración, respiración del suelo y microorganismos, se muestran en el Anexo 2.

Descripción del área de estudio

Turrialba es el cantón número cinco de la provincia de Cartago. Tiene una extensión de 1642 km², y está formado por 12 distritos. La zona presenta suelos ultisoles, inceptisoles y entisoles.

Este cantón presenta seis unidades geomórficas influenciadas por los volcanes Irazú y Turrialba y está caracterizado por elevaciones entre 60-3800 msnm. La población del territorio cantonal es de 69616 habitantes [34] y la mayor concentración demográfica se observa en los distritos de Turrialba y La Suiza. La principal fuente laboral y de generación

de ingresos en este cantón es la producción de café y caña de azúcar [35]. En las zonas medias y bajas de Turrialba, se ha documentado una temperatura promedio de 22.0°C, una velocidad promedio del viento de 0.5 m/s, una precipitación promedio de 224.7 mm/mes y una evapotranspiración de 93.8 mm/mes. FEIMA, por su parte, es un lugar que se encarga de facilitar e integrar aspectos relacionados con la investigación, docencia y acción social, con la finalidad de generar y transferir tecnología enfocada principalmente en materia agroecológica. Presenta un área de 39.0 ha, y se encuentra dividida en tres secciones destinadas a actividades diferentes. La primera sección es un área en la que se desarrolla agricultura con un total de 8.5 ha, la segunda área se ubica la actividad de ganadería de engorde con 9.1 ha, y la última es la sección de bosque con un área de aproximadamente 21.4 ha. La precipitación media mensual es de 249.1 mm con una temperatura promedio al mes de 23.0 °C y un promedio de velocidad de viento por mes de 2.4 m/s.

Generación de mapas digitales

Para el presente trabajo se tomó la información registrada del suelo y se asoció con una base de datos georreferenciada. Con base en la zonificación ya existente del lugar se ha traducido la información obtenida a una escala numérica. Esto ha permitido la asignación de valores a los píxeles dentro de cada unidad de muestreo para la creación de “rasters” (matrices de información codificada en SIG que está formada por unidades discretas con valores únicos) que fueron analizados de forma conjunta con la información territorial que se tenía de FEIMA. En este proyecto se ha utilizado el tipo de levantamiento detallado, adecuado para áreas forestales.

Con lo anterior, se ha podido desarrollar un sistema de registros visuales de la variabilidad de parámetros, que tras un análisis estadístico multivariado ha permitido la creación de un mapa de variables principales. Esto mediante un modelo experimental con que ha considerado la actividad microbiana del suelo (mixogástridos y la respiración microbiana) como variables de respuesta.

Muestreo de suelo

Para llevar a cabo este proyecto se ha sectorizado la finca por medio de un sistema de cuadrículas de tamaño único (alrededor de 1 ha cada una) creado a partir de un modelo espacial nulo construido *a priori* para minimizar sesgos asociados a las características *in situ*. Este sistema ha generado un total de 45 cuadrículas que han sido estudiadas a partir de sus centroides espaciales (Figura 1) de las cuales el enfoque se ha centrado sobre 28, que son las correspondientes con la zona de bosque en FEIMA.



Figura 1. Colocación de marcas en los centroides de las cuadrículas de FEIMA durante la fase de planeamiento de este proyecto.

La toma de muestras de suelo se ha llevado a cabo utilizando la técnica compuesta. Con lo anterior, se procedió a sectorizar el lugar de acuerdo con el uso de suelo y paisaje de la región,

dividiendo el mismo en tres zonas denominadas agrícola (AA), bosque (BF, BM, BA) y de ganadería (AG) (Figura 2).

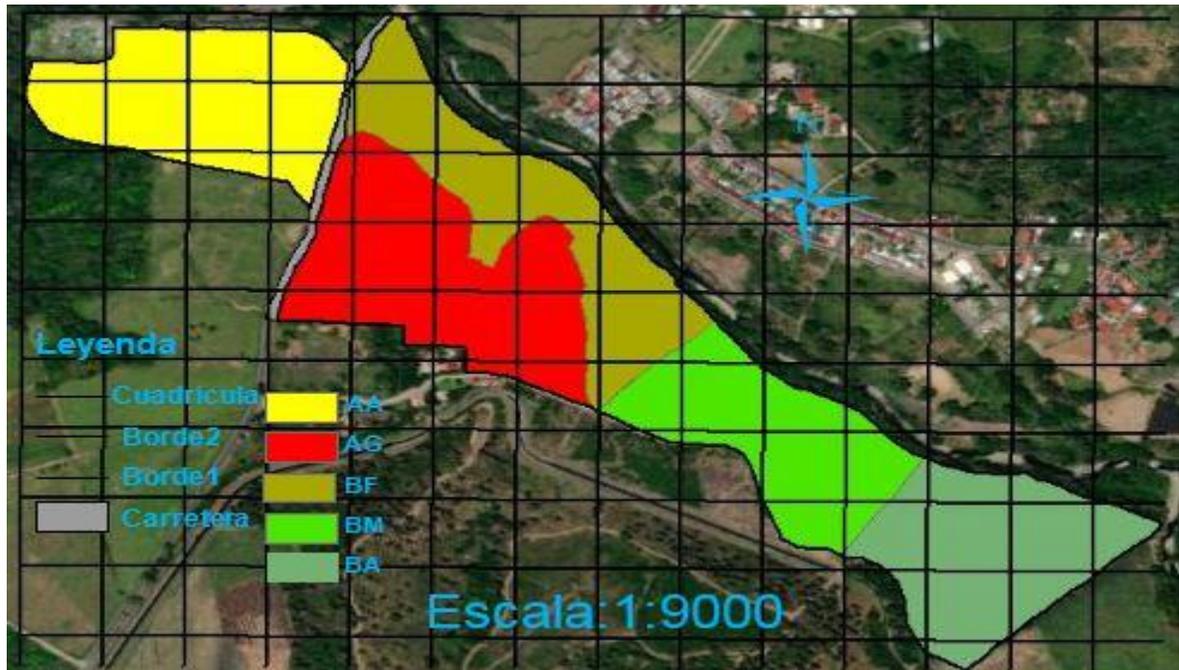


Figura 2. Zonificación de FEIMA, a partir de los usos del suelo presentes en el área.

Análisis de suelo

La caracterización primaria de FEIMA se ha llevado a cabo a partir de las 45 muestras de suelo recolectadas en toda la finca. De estas muestras, 28 se han extraído de la zona de bosque, mientras que las restantes 17 han correspondido a zonas de agricultura o ganadería. Si bien el enfoque de este proyecto ha sido en las primeras, se ha considerado pertinente haber llevado a cabo esta caracterización primaria en toda la finca con el objeto de poder establecer las diferencias respectivas entre las variables asociadas a los diferentes tipos de uso del suelo.

Textura

Para determinar la textura de todas las muestras de suelo (200 g), estas se recolectaron de 0-20 cm utilizando un barreno y se llevaron al laboratorio. Estas muestras fueron secadas al horno y tamizadas en una malla de 2 mm, para eliminar granulometría no deseada. Una vez que se limpiaron las muestras se tomó suficiente material (35 g) para llenar un 25% de un recipiente de vidrio de alrededor de 355 ml, al cual se le había añadido suficiente agua (170 ml) y un surfactante (unas gotas) como para ocupar un 75% de su capacidad. La solución se agitó durante 15 minutos y tras ello se dejó reposar (Figura 3). Tras un minuto se midió el nivel de la arena, tras dos horas el nivel del limo y tras tres días el nivel de las arcillas.

Para el cálculo de los porcentajes de arena, limo y arcilla se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\% = \left(\frac{\text{grosor de capa de interés}}{\text{grosor de capa de sedimentos}} \right) \times 100 \quad (1)$$



Figura 3. Deposición de sedimentos correspondientes a una muestra experimental durante la prueba de las clases texturales de los suelos de FEIMA.

Una vez que se tuvo el contenido relativo porcentual de las partículas, este valor se tomó como punto de partida para calcular la Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez

Permanente (PMP) del suelo. Para lo anterior, se usó el software Soil Water Characteristics (Washington State University).

El programa maneja por recomendación valores de materia orgánica (MO), salinidad y grava, de manera general. No obstante, en el presente estudio se utilizó un valor de MO de 3.1 %, una salinidad de 0.1 dS/m, obtenidos del análisis químico del suelo en el CIA. Además, un porcentaje de grava de 3.0 % calculado mediante el tamizaje de las pruebas texturales en el laboratorio de REFORESTA, y que son propiamente valores de FEIMA.

Con esas dos propiedades hídricas se utilizó la ecuación 2, para el cálculo de la Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD).

$$CRAD (\%) = CC - PMP \quad (2)$$

Color

Se utilizó 165 g de las muestras de suelo de la prueba anterior para registrar el color, antes de secarlas. Para ello, se anotó el estado físico en cuatro categorías (roto, frotado, triturado y alisado) y se hizo una descripción del nombre del color, la notación Munsell, el estado del agua y el mencionado estado físico. Este proceso se llevó a cabo en estado húmedo por el método de determinación al tacto.

Propiedades químicas

De igual forma que en los casos anteriores, se recolectó muestras separadas de suelo con un barreno para la determinación de las propiedades químicas. Para registrar estas variables se han utilizado las 45 muestras (500 g), extraídas a una profundidad de 15.0 cm (Figura 4). A

cada una de ellas se le determinó la concentración de Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn y Mn con la solución extractora KCl- Olsen Modificado [36].

Para la medición de pH del suelo se enviaron las muestras al laboratorio del CIA, y se utilizó la metodología de Mclean, 1982 [37] y, para la acidez los métodos de titulación y retitulación detallados en 1990 [ver 36], con la solución extractora KCl- Olsen Modificado.



Figura 4. Imagen del suelo en la sección de potreros de FEIMA tras la extracción de la muestra con barreno para la realización de pruebas químicas.

Los resultados de las propiedades químicas registradas se ordenaron en cuatro grupos [38] denominados 1) parámetros de acidez, 2) Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE) y bases, 3) relaciones catiónicas y 4) P y micronutrientes (ver Cuadro 2). Además, se evaluó las categorías en los niveles críticos generales, condiciones medias y altas para interpretar el análisis químico del suelo (ver Anexo 3).

Cuadro 2. Grupos de las propiedades químicas del suelo, para el análisis de fertilidad.

Bases	Parámetro de Acidez	P y micronutrientes	Relaciones Catiónicas
Calcio (Ca)	Ph	Fósforo (P)	Ca/Mg
Magnesio (Mg)	Acidez	Cobre (Cu)	Ca/K
Potasio (K)	Porcentaje Saturación Acidez (%SA)	Zinc (Zn)	(Ca+Mg)/K
	CICE	Manganeso (Mn)	Mg/K
		Hierro (Fe)	

Con las variables anteriores obtenidas de manera general, se realizó registros visuales del comportamiento espacial de las mismas. Además, sirvió de base para la creación de un mapa de fertilidad que permitió ubicar geográficamente las condiciones de nutrimentos en el área.

Tras la caracterización primaria realizada en toda la finca, se llevó a cabo una caracterización secundaria, de otras variables (porosidad, infiltración, respiración de suelo y microorganismos), asociadas con el suelo en la zona de estudio. Sin embargo, las dos últimas se muestrearon únicamente para la sección boscosa de FEIMA.

Porosidad

Para el cálculo de esta variable se necesitó determinar la densidad aparente del suelo (ver ecuación 3) y se utilizó un valor de 2.65 g/cm^3 como valor de densidad real [13]. Por ello, se extrajo muestras de volumen conocido (67.9 cm^3), con un barreno de doble anillo (ver Figura 5) y se siguió el método descrito por Forsythe [10].



Figura 5. Extracción de suelo con el método de volumen conocido, para las pruebas de densidad aparente de las muestras de FEIMA.

$$\emptyset = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (3)$$

donde:

\emptyset : porosidad (%)

ρ_a : densidad aparente (g/cm^3)

ρ_r : densidad real (g/cm^3)

La densidad aparente es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total incluyendo el espacio poroso. Esta masa de suelo seco se obtuvo a partir del secado de la muestra de suelo (ver Figura 6) en una estufa a $110.0\text{ }^\circ\text{C}$ ($230.0\text{ }^\circ\text{F}$) durante 24 horas [39].



Figura 6. Muestras de suelo de FEIMA en el proceso de secado durante la determinación de la densidad aparente.

Infiltración

Para calcular la infiltración se utilizó el método de Porchet. Para esto, se excavó un agujero cilíndrico de radio (10-30 cm) y profundidad constante (30-40 cm), en el terreno a evaluar (Figura 7).

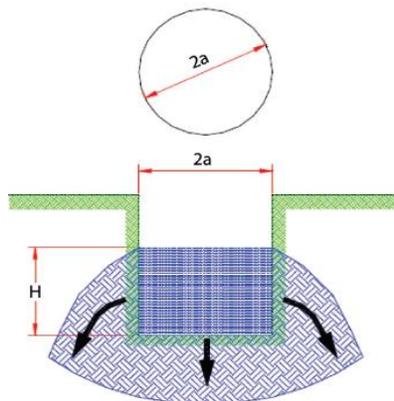


Figura 7. Esquema mostrando el agujero cilíndrico del modelo Porchet, utilizado para obtener la infiltración del suelo [40].

De esta forma, la infiltración se pudo determinar con la siguiente ecuación, según el esquema de la figura anterior.

$$f = \frac{R}{2 * (t_2 - t_1)} * \ln \left(\frac{2 * h_1 + R}{2 * h_2 + R} \right) \quad (4)$$

Para obtener la infiltración del terreno se midió dos pares de valores, (h_1, t_1) y (h_2, t_2) , de tal manera que los tiempos t_1 y t_2 no fueran muy distantes entre sí. Durante el proceso de medición, una vez que se construyó el agujero de forma circular (con un radio de 11 cm y una profundidad de 30 cm, (ver Figura 8), se llenó el mismo hasta una altura de 25 cm y se marcó el nivel del agua en el cilindro. Se realizó mediciones del nivel del agua en el agujero a los 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. Tras este tiempo, se continuó la medición del nivel del agua cada hora hasta haber completado un tiempo de 3-4 horas [41].



Figura 8. Agujero cilíndrico del modelo Porchet para medir la infiltración, implementado en FEIMA.

Respiración del suelo

Para obtener los valores de respiración de suelo, se pesó 30.0 g de suelo, que se colocaron en un recipiente con tapa, dentro del cual se ubicó además un beaker con 10.0 ml de NaOH de

concentración conocida (0.2 mol/L, ver Figura 9). El envase se cerró por 2.0 horas, tras lo cual se trasvasó el contenido del beaker a un erlenmeyer, con 2.0 ml de $BaCl_2$ al 10%.



Figura 9. Muestras de suelo (fondo del recipiente) durante la prueba de respiración de suelo. Se puede observar el beaker con NaOH de concentración conocida.

Tras la adición de tres gotas de timolftaleína, se procedió a realizar la valoración con HCl de concentración conocida (0.1 mol/L) [27] y se calculó la cantidad de CO_2 con la ecuación de Stotzky (1965)

$$\text{Miligramos de C} - CO_2 = (B - V) * NE \quad (5)$$

dónde:

B: volumen en mililitros de HCl necesarios para valorar el NaOH sin ser expuesto al suelo. (blanco)

V: volumen en mililitros de HCl necesarios para valorar el NaOH siendo expuesto al suelo.

N: molaridad del HCl

E: peso equivalente del carbono

$$E = \frac{\text{Masa atómica } (CO_2)}{\# \text{Valencia}} - \frac{\text{Masa atómica } (C)}{\# \text{Valencia}} = \frac{44}{2} - \frac{12}{2} \quad (6)$$

$$E = 16$$

Microorganismos (micetozoos)

Para estudiar la actividad biológica en el suelo se escogió el grupo de microorganismos conocidos como micetozoos.

Para lo anterior, se tomó una muestra de suelo de 5.0 g en cada uno de los puntos cardinales asociados con el punto de muestreo de suelo en la hectárea de bosque correspondiente. Estas cuatro muestras semi-independientes se llevaron al laboratorio en donde fueron diluidas con 45.0 ml de agua. Tras agitación por 15 minutos, se tomaron tres gotas de la solución y se colocaron sobre placas de Petri previamente llenadas con medio de cultivo de agar-heno.

Al microcosmos creado se le añadieron dos gotas de una suspensión viva de la bacteria *Escherichia coli* y tras tres días de incubación a temperatura ambiente, cada una de las muestras fue revisada al estereoscopio para registrar incidencia. El grupo conocido como dictiostélidos se registró a partir de la presencia de colonias identificadas por los sorocarpos de las diferentes especies. El conjunto de colonias se documentó como una muestra con actividad positiva. Para los mixomicetes, el registro se realizó a partir de la presencia de plasmodios y/o cuerpos fructíferos creciendo directamente del agar. De forma similar al anterior caso, una muestra positiva fue aquella en la que se registró actividad alguna (Figura 10).

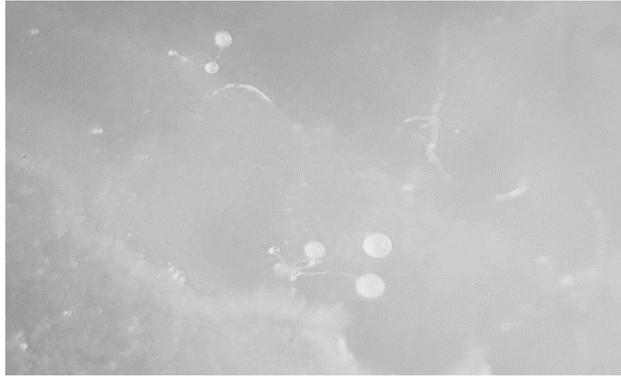


Figura 10. Sorocarpos de dictiostélidos obtenidos en cultivos de suelo durante la prueba de incidencia de microorganismos.

Además, se calculó el índice de diversidad de Simpson (1-D) y el índice de Chao 1. El índice de Simpson (ver ecuación 6), indica que tan diverso es la especie en una zona [42]. Donde, cero es un sitio poco diverso y uno un sitio con alta diversidad. El índice de Chao 1 (ver ecuación 7), es un indicador del máximo número de especies teóricamente posibles de encontrar en un sitio [42].

$$\text{Indice Simpson} = 1 - D = 1 - \sum p_i^2 \quad (6)$$

donde:

p_i : abundancia proporcional de la especie, es decir, número de individuos de la especie dividido entre el número total de individuos de la muestra.

$$\text{Chao 1} = S + \frac{a^2}{2b} \quad (7)$$

donde:

S: número de especies en una muestra

a: número de especies que están representadas solamente por un único individuo en esa muestra

b: número de especies representadas por exactamente dos individuos en la muestra

Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Para realizar el estudio de la susceptibilidad a deslizamiento, se utilizó la Metodología Mora Varhson (MMV) modificada a partir de la fórmula.

$$S = (P_l * P_h * P_p) * (D_s + D_u) \quad (8)$$

donde:

S: grado de susceptibilidad a deslizamientos

P_l: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

P_h: valor de parámetro de humedad del terreno

P_p: valor del parámetro pendiente

D_s: valor del parámetro de sismicidad

D_u: valor de parámetro por lluvia

El resultado de la combinación de los factores descritos anteriormente no se encuentra establecida en una escala única de valores del indicador. Lo anterior, por tanto, esta escala debe ajustarse a la zona de estudio. Sin embargo, lo recomendable es dividir el rango de valores obtenidos en cinco clases de susceptibilidad y asignar el atributo, junto con los factores Activos y Pasivos del índice de Susceptibilidad a Deslizamiento (ver Anexo 4).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la clasificación de USDA y el porcentaje de las fracciones texturales (Cuadro 3) de las partículas respecto al tamaño, FEIMA presentó clases texturales que van de textura gruesa a media.

Cuadro 3. Parámetros estadísticos del porcentaje de arena, limo y arcilla, de acuerdo al uso de suelo en FEIMA a 20 cm de profundidad en FEIMA (n=45).

Uso	Fracción (%)	Promedio (desviación)	Máximo	Mínimo
Agrícola	Arena	59.5 (15.6)	87.0	43.5
	Limo	35.0 (15.7)	52.2	8.7
	Arcilla	5.5 (1.9)	9.1	4.2
Bosque	Arena	64.4 (11.6)	81.0	47.6
	Limo	30.8 (11.0)	47.8	12.0
	Arcilla	5.9 (3.1)	19.0	4.2
Ganadería	Arena	51.8 (13.3)	71.4	35.7
	Limo	42.5 (12.8)	54.2	23.8
	Arcilla	5.7 (2.3)	10.7	4.0

Se encontraron cinco clases texturales en la capa superficial (0-20 cm) de FEIMA. De estas, la textura Franco Arenoso fue la de mayor frecuencia con una presencia del 62% en el total de las muestras (Figura 11). La clase textural Arenoso fue la más rara con un 2% de las muestras estudiadas

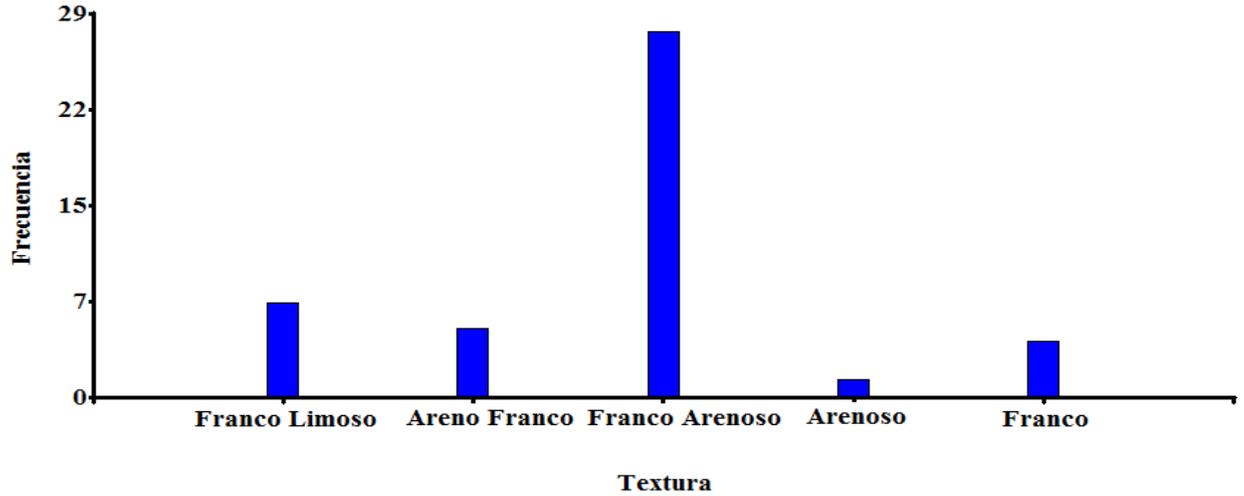


Figura 11. Distribución de frecuencias absolutas según clases texturales de suelo en la capa superficial en FEIMA (n=45).

Generalmente, la textura del suelo influye en ciertas características físicas como lo son la porosidad, la densidad aparente, la retención de humedad y algunas propiedades hidráulicas [43].

Al tener datos de densidad aparente en las 45 parcelas, se decidió investigar la influencia que tiene la, textura en su comportamiento. Se realizó un análisis estadístico para estudiar si en este caso se comporta de igual manera a la teoría. Sin embargo, al realizar el ANOVA no se notaron diferencias significativas entre ambas propiedades físicas del suelo ($F(1,89)= 0.83$, $P=0.51$). En este caso, cuando se tienen clases texturales (media, gruesa), sin influencia de suelos finos, generalmente las variables presentan una direccionalidad distinta [44]. No obstante, existen rangos teóricos que relacionan la textura (media y gruesa) del suelo con sus densidades aparentes, de manera general, es decir, sin tomar en cuenta la clasificación taxonómica del suelo. Para este trabajo, la textura media presenta un rango de 0.80-1.21

g/cm³, con un promedio de 1.01±0.26 g/cm³, para la textura gruesa 1.15-1.37 g/cm³, un promedio de 0.98±0.17 g/cm³ similares a otros estudios realizados en suelos [45].

Los datos de la (Figura 12) concuerdan con rangos tabulados asociados con las características de humedad del suelo en función de la clase textural [46]. Generalmente, en suelos de textura gruesa debido a la influencia de la porosidad, existe menor porcentaje de CRAD, caso contrario en texturas medias donde presentan mayor porcentaje de agua retenida por el suelo que puede ser absorbida por las plantas, (ver Anexo 5).

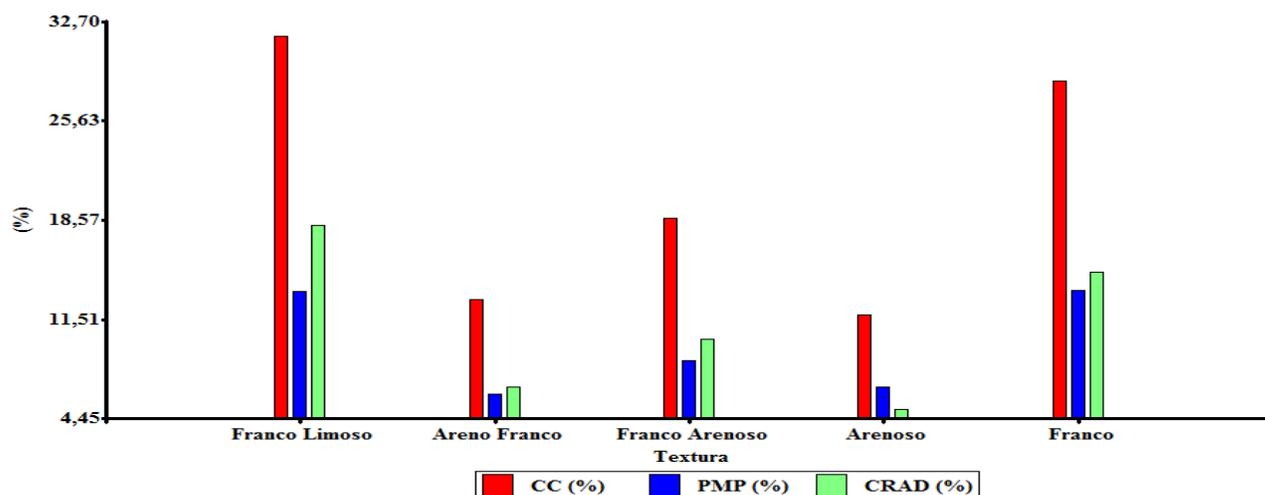


Figura 12. . Parámetros de humedad del suelo, de acuerdo con las clases texturales de las 45 muestras de FEIMA.

Respecto a la zonificación, en el Cuadro 4, se muestran los resultados de la interpolación realizada en la zona de estudio tomando como referencia el mapa textural (Figura 13(a)).

Cuadro 4. Área (en ha) asociada con las clases texturales y la zona de trabajo en FEIMA según los resultados del presente estudio.

Clase textural	Zona (ha)				
	AA	AG	BF	BM	BA
Franco	3.6	--	--	3.0	3.1
Franco Arenoso	3.1	3.4	3.8	3.4	3.7
Arenoso	0.4	--	--	--	--
Areno Franco	0.4	--	1.2	--	--
Franco Limoso	1.0	5.7	2.7	0.1	0.4

Generalmente los colores superficiales del suelo en un lugar en específico presentan gran variación debido a la presencia de más de un tipo de cubierta. En FEIMA, los resultados de esta prueba demostraron que los suelos presentaron coloraciones claras de acuerdo con su matriz ya que se encontraron entre 7.5YR y 10YR en el sistema de notación Munsell (Cuadro 5). Esto indica con periodicidad un empobrecimiento de Fe y Mn [7]. De forma similar, el parámetro de valor de todas las muestras se encontró en el rango de los colores más oscuros (0-5) lo que indica una mayor concentración de materia orgánica en ese horizonte y según el chroma, los suelos analizados mostraron expresión débil (gris), este color indica presencia de reducción en el suelo (falta de aire oxígeno) sea por mal drenaje y/o mala estructuración del suelo [11].

Cuadro 5. Distribución porcentual de las muestras de suelo analizadas en este estudio según color definido por el sistema de notación Munsell.

Descripción (Color)	Frecuencia relativa (desviación estándar)
Marrón muy oscuro (7.5YR 2/3)	9% (1)
Marrón oscuro (7.5YR 3/3)	18% (2)
Café (7.5YR 4/4)	9% (1)
Negro parduzco (7.5YR 3/2)	31% (4)
Café oscuro (10YR 3/3)	27% (4)
Gris amarillento marrón (10YR 4/2) Mal drenaje	7% (-)

Cuando los suelos se encuentran en estados iniciales a intermedios de alteración bajo ambientes de oxidación, presentan los tipos de decoloración observados en FEIMA. Con base en los rangos de interpretación de análisis de suelos [47], se conoce que estos tonos se relacionan con condiciones bajas o medias de materia orgánica (MO) [48], lo cual fue además observado en los porcentajes medios de MO determinados en este estudio (entre 2.2-3.7%). De forma interesante, no se observaron diferencias en la MO por color de suelo ($F(1.89)=0.59$, $P=0.71$) pero si se observaron diferencias en este color de acuerdo con la categoría de uso de la tierra ($\chi^2=28.8$, $gl=10$, $P=0.001$), lo cual indica que en FEIMA el color estuvo más bien determinado por el uso del suelo.

En la (Figura 13(b)) se muestra el mapa de color del suelo en FEIMA, en la zona uno (AA) presentó en su totalidad suelos de color marrón oscuro, con una notación Munsell 7.5YR 3/4 (una parte en la zona del BM, donde el suelo se encuentra en su mayoría desnudo, también mostró este color). En estos sitios, los principales agentes o factores potencialmente

influyentes en el color final son el contenido de MO (medio), y la constante labranza que revuelve el suelo.

Las otras dos regiones de color se encontraron distribuidas en BA, BF y el AG. La mayoría de área del BF, BM, BA noroeste y la totalidad de AG, presentaron el color café oscuro con notación Munsell 10YR 3/3, mientras que el negro parduzco con notación Munsell 7.5YR 3/2 se observó solamente en el BA y BM. Estas zonas son las que presentan a nivel superficial mayor cobertura vegetal con valores de MO más altos y poca perturbación de actividades antrópicas.

Los parámetros de acidez y bases, se muestran en el Cuadro 6, con sus respectivos niveles utilizados para la interpretación de fertilidad en Costa Rica. Para este estudio se encontraron tres (crítico, medio y alto). Ahora bien, con las 45 muestras del suelo en FEIMA, se realizó la distribución de las mismas en esos tres niveles.

Cuadro 6. Cantidad de muestras del suelo en FEIMA, distribuidas según los parámetros de acidez y Bases y su respectiva categoría.

	Bases (cmol(+)/L)				Parámetros de Acidez		
	Ca	K	Mg	Ph	Acidez (cmol(+)/L)	%SA	Suma bases (cmol(+)/L)
Nivel							
Crítico	0.0	14.0	0.0	4.0	43.0	44.0	0.0
Media	45.0	23.0	17.0	36.0	1.0	1.0	44.0
Alta	0.0	8.0	28.0	5.0	1.0	0.0	1.0

Del total de las muestras de Acidez Intercambiable y el %SA se encontró, en un 96% y 98%, respectivamente en niveles críticos (ver Anexo 2). Lo anterior, no representa un problema

para el desarrollo o crecimiento radicular de los cultivos, para ambas variables de acidez (pese a ser crítico) [38]. Sin embargo, el valor óptimo de %SA para los cultivos en general se encuentra entre el 10% y 25% [47], y que de acuerdo a lo que se obtuvo solamente el 1%, presenta esta condición.

Del total de las muestras de pH, solo el 9% se encontraron en niveles críticos en el suelo (ver Anexo 2). Lo anterior, afecta el desarrollo radicular (considerar tolerancia de cultivo), así como la absorción y disponibilidad de nutrientes [38].

Respecto a la CICE, la Finca presenta valores en un rango de 15.0-25.3 cmol(+)/L, con un promedio de 19.3 ± 2.8 . Partiendo de lo anterior, el suelo se encuentra en condiciones medias y altas (ver Anexo 2) de CICE, es decir, en condiciones generales de baja acidez [38].

Los niveles de Ca y Mg se registraron en niveles medios y altos para todas las muestras y el K en niveles críticos en un 31% de los casos (ver Anexo 2). Al analizar los antagonismos que se pueden dar entre las bases de Ca, Mg y K, se encontró para la relación Ca/Mg que el 36% de las muestras analizadas se encuentran en niveles críticos. De forma similar, el 73%, el 71% y el 53% de las muestras estudiadas se encontraron en niveles críticos en las relaciones Ca/K, Ca+Mg/K y Mg/K, respectivamente (ver Anexo 2). Lo anterior, muestra un desequilibrio químico en el suelo que puede tener un efecto sobre el desarrollo de cultivos o plantas de acuerdo con sus requerimientos. Las malas condiciones edáficas como, por ejemplo, los niveles críticos de las relaciones catiónicas, pueden llegar a afectar el crecimiento a temprana edad de árboles de especie tropical (p.e. *Tabebuia sp.*, *Erythrina sp.*), perjudicando el área foliar del mismo cuando alcanza el estado adulto [49, 50].

Respecto al P y los micronutrientes, los niveles críticos porcentuales de acuerdo con el total de las muestras analizadas fueron del 71% para P, 51% para Zn y 7% para Mn (ver Anexo 2). La cantidad de muestras en condición crítica del P coincide con estudios previos realizados en Costa Rica que reportan porcentajes del 76% de deficiencia de este elemento mineral. Además, se asocia con la presencia de micorrizas adaptadas a las especies que se desarrollan en este tipo de bosques [51]. Con respecto al Zn, se encontró un 51% del total de las muestras en niveles críticos. Este valor fue similar al de otros estudios en suelos nacionales (Costa Pacífica, Región Atlántica, Zona Norte y sector Caribe), que es del 49% [38]. Para el Cu el 100% de las muestras analizadas se encontraron en nivel medio y alto, lo cual también coincide con observaciones previas que indican que solo el 1% de los suelos de Costa Rica presentan niveles críticos de ese elemento [38]. Además, de acuerdo con una investigación realizada [51] donde indican que los suelos en bosques de áreas tropicales presentan valores bajos de elementos (P, K, Mg, Cu y Zn) que afectan el desarrollo de los árboles en relación con su diámetro. De estos nutrientes solamente el Mg y el Cu se encontraron en el rango medio y alto para todas las muestras realizadas (ver Anexo 2).

Teniendo como referencia valores por encima de 75.0 mg/L de Mn, no es raro (alrededor del 10%) en Costa Rica, encontrar suelos con niveles críticos de este micronutriente, lo cual ha sido similar a lo observado en los suelos de FEIMA [38]. Respecto al Fe el 100% de las muestras de FEIMA se encontraron por encima de su valor crítico de 10.0 mg/l, sin generar toxicidad. Para el análisis de fertilidad del suelo, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), desarrolló tres categorías (alta,

media y baja), tomando como referencia principalmente el %SA y la CICE [ver 52].
Partiendo de lo anterior, y en los datos registrados en este estudio, previamente mencionados, se ha estimado la fertilidad de FEIMA (Figura 13(c)).

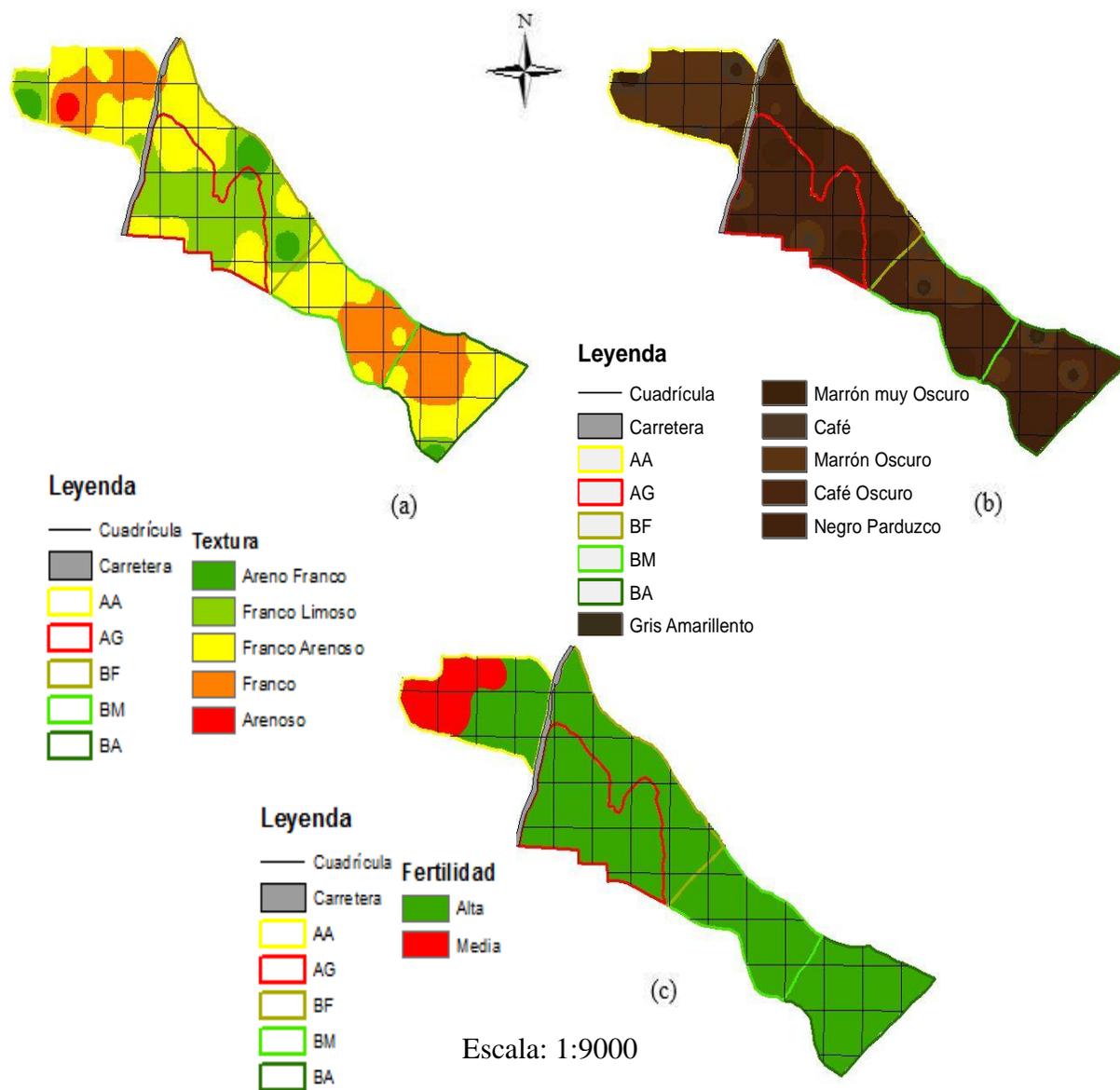


Figura 13. Mapas de la caracterización primaria llevada a cabo en toda la finca: (a) Textura, (b) Color, (c) Fertilidad.

Con estos datos se observó que las zonas de bosque y de ganadería (AG), presentaron una categoría alta de fertilidad mientras que la zona agrícola (AA) mostró entre fertilidad media (3.56 ha) y alta (4.96 ha). Además, no se observaron diferencias significativas ($\chi^2=1.34$,

gl=2, $P=0.52$) entre este estimador y el manejo del suelo actual de la finca. Sin embargo, si se registraron diferencias en los valores de CICE ($F(1.44)=6.63$, $P=0.01$) y porcentaje de saturación de acidez ($F(1.44)=44.51$, $P=0.0001$) en relación con la fertilidad.

Los datos de densidad aparente (g/cm^3) de las 45 parcelas de FEIMA mostraron un rango entre 0.6-1.4 g/cm^3 , con un promedio 1.0 ± 0.18 g/cm^3 . Las densidades aparentes del suelo generalmente se encuentran entre 1.0-1.7 g/cm^3 , por lo que se pudo observar que la mayoría de las muestras se encontraron en un rango preestablecido [13]. A pesar de lo anterior, es necesario tomar en cuenta la clase textural para una mejor interpretación. Así, los valores de densidad aparente en FEIMA fueron 1.15 ± 0.0 para la textura Arenoso, 0.98 ± 0.3 para Arenoso Franco, 0.96 ± 0.2 para Franco Arenoso, 1.08 ± 0.2 para Franco Limoso y 0.99 ± 0.2 para Franco. Partiendo de lo anterior, y basándose en estudios realizados de densidad aparente respecto a la relación con el crecimiento de las plantas y rangos ideales (sin compactación). Se observó que los resultados se encontraron en estos rangos para las diferentes clases texturales. Por lo tanto, el crecimiento radicular de plantas y cultivos no debería de verse afectado en ninguna sección de la finca [53].

Ahora bien, la porosidad del suelo generalmente se encuentra en un rango del 30-70% y para este estudio se obtuvieron valores que oscilaron entre 48.17-77.67 % en todas las parcelas evaluadas, con un promedio 62.77 ± 6.86 %. La porosidad es inversamente proporcional a la densidad aparente debido a que una mayor compactación disminuye la dimensión de los espacios vacíos entre los constituyentes del suelo [54]. En el presente proyecto no se observaron diferencias en la porosidad por uso de la tierra o por textura. Sin embargo, en el

Cuadro 7, se presentan los promedios, máximo, mínimo y la desviación estándar de la porosidad, de acuerdo con estas últimas variables.

Cuadro 7. Parámetros estadísticos de la porosidad de acuerdo con el uso y la textura del suelo, en FEIMA (n=45).

Zona de uso Tipo suelo	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio (desviación)
Agrícola	64.7	55.3	59.9 (3.4)
Franco Arenoso	64.7	59.6	61.7 (2.0)
Franco Limoso	56.0	55.3	55.6 (0.5)
Bosque	77.7	48.1	64.2 (7.4)
Areno Franco	77.7	48.1	62.0 (12.1)
Franco	67.5	66.0	66.8 (0.8)
Franco Arenoso	76.0	49.1	64.2 (7.1)
Ganadería	70.2	54.5	62.5 (6.2)
Franco Arenoso	70.2	62.3	65.2 (4.4)
Franco Limoso	69.9	54.5	60.8 (6.9)

No se encontraron diferencias significativas en la porosidad asociada con las zonas de bosque y ganadería pero si se observaron entre la zona agrícola y las otras dos ($F(1,6)=15.51$, $P=0.01$). Lo anterior indicó, que los procesos de labranza, manejo de plagas y control de maleza en la zona agrícola tienen un efecto sobre las características de porosidad del suelo con respecto a las otras zonas de FEIMA. Al realizar la interpolación de la porosidad (Figura 17(a)) y al asignar una categoría [ver 55] a los valores de porosidad asociados a las diferentes zonas de la finca se observó que la mayor extensión de esta tiene suelos con muy alta porosidad (Cuadro 8).

Cuadro 8. Distribución del área (en ha) asociada con las categorías de porosidad y zonas de uso del suelo en FEIMA.

Zona	Categoría de porosidad		
	Muy alta	Alta	Media
AA	4.3	4.2	--
AG	6.0	3.1	0.01
BF	7.2	0.5	--
BM	5.4	1.1	0.05
BA	7.0	0.2	0.04

Los datos de infiltración obtenidos se encontraron en un rango de 551.8-3405.2 mm/día, con un promedio de 1679.4 ± 953.9 mm/día. En la (Figura 15), se muestra la curva de infiltración obtenida para un punto de muestreo dedicado a la ganadería y su infiltración acumulada asociada.

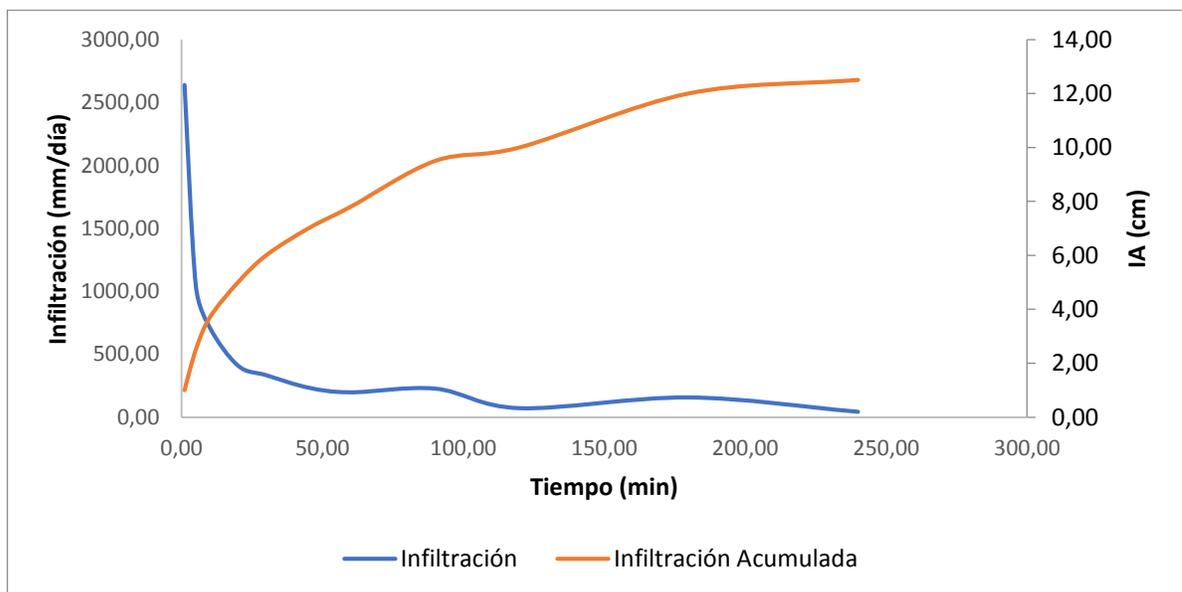


Figura 14. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada (IA) observados en un punto de muestreo en FEIMA con uso de suelo dedicado a la ganadería.

La fuerte variación observada en los primeros minutos demuestra que las condiciones iniciales del suelo eran de déficit de humedad. Esto no es sorprendente tomando en cuenta que las pruebas se hicieron en febrero de 2019, durante un periodo seco generalizado a nivel nacional. Para la zona de Turrialba, se ha reportado (según CATIE) que durante febrero las precipitaciones generalmente no sobrepasan los 145.0 mm/mes. Es así, como la velocidad de infiltración inicial fue alta y la curva de IA tendió a crecer en un principio de manera rápida. Para este punto de muestreo la infiltración en la matriz del suelo llegó hasta 12.5 cm de profundidad. Sin embargo, el rango observado en FEIMA fue de 12.5-84.1 cm, con un promedio de 48.9 ± 22.5 cm. Los valores máximos se obtuvieron en los puntos de muestreo en el parche boscoso por lo que existe una variabilidad espacial en las propiedades hidrofísicas de los diferentes puntos de observación.

Cuando se realizan estudios de infiltración cerca de la superficie, se debe considerar que este parámetro es muy sensible y que se encuentra influenciado por otras propiedades del suelo. Por esta razón en la (Figura 16) se muestran dos curvas asociadas con puntos de muestreo característicos de texturas de suelo diferentes. La curva azul, asociada con la clase textural Franco Arenoso (textura gruesa) y obtenida de un punto de muestreo en el bosque, mostró una velocidad de infiltración mayor que la curva naranja realizada con datos obtenidos en una zona dedicada a la ganadería y con un suelo Franco Limoso (textura media). Estos datos coinciden con otros estudios realizados [56].

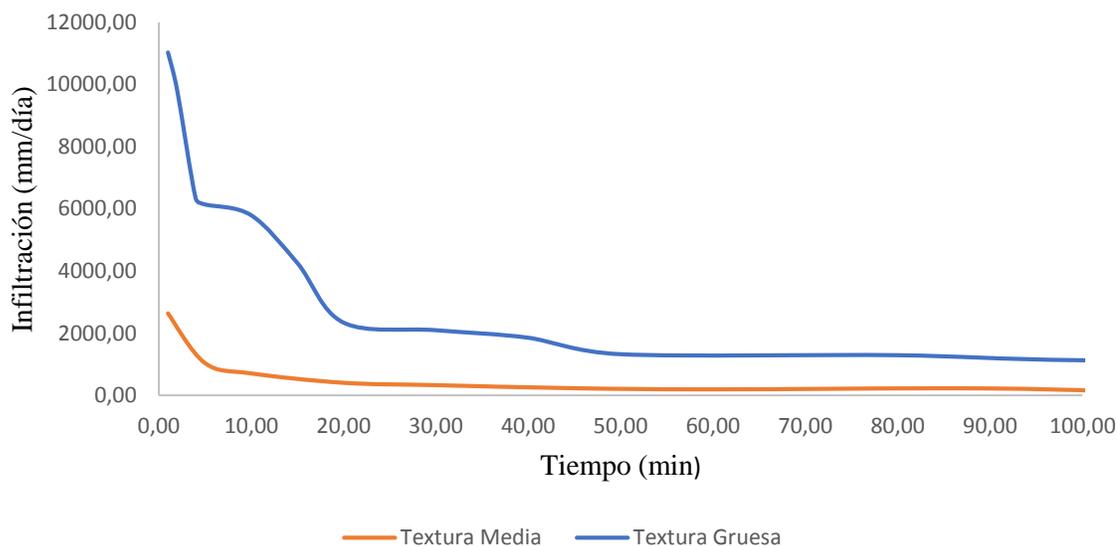


Figura 15. Velocidad de infiltración observada en dos puntos de muestreo asociados con dos clases texturales y tipos de uso de suelo en FEIMA.

Cuadro 9. Parámetros estadísticos de infiltración (cm/h) de acuerdo con el uso y la textura del suelo en FEIMA (n=8).

Uso del suelo Clase textural	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio (desviación)
Agrícola	60.0	1.3	9.8 (12.5)
Bosque	46.0	0.8	8.6 (10.8)
Ganadería	21.9	0.2	3.3 (4.3)
Areno Franco	60.0	1.3	9.2 (13.2)
Franco	19.8	1.2	4.7 (5.8)
Franco Arenoso	49.7	0.7	8.4 (10.7)
Franco Limoso	11.0	0.2	2.3 (3.1)

En el (Cuadro 9) se muestran los parámetros estadísticos de infiltración con respecto al uso del suelo y la textura. Con estos valores se observaron tanto diferencias en la infiltración según el uso del suelo dentro de la Finca ($F(1,7)=11.91$, $P=0.0001$) como en relación con la

textura ($F(1,7)=6.14, P=0.02$). Lo anterior se observó principalmente entre texturas medias y gruesas.

Para el reconocimiento edafológico del estudio de las velocidades de infiltración, el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de los Estados Unidos, desarrolló siete clases que oscilan de lo impermeable a lo muy rápido [13]. A partir de estas clases y la zonación de la finca se desarrolló el mapa de infiltración (Figura 17(b)).

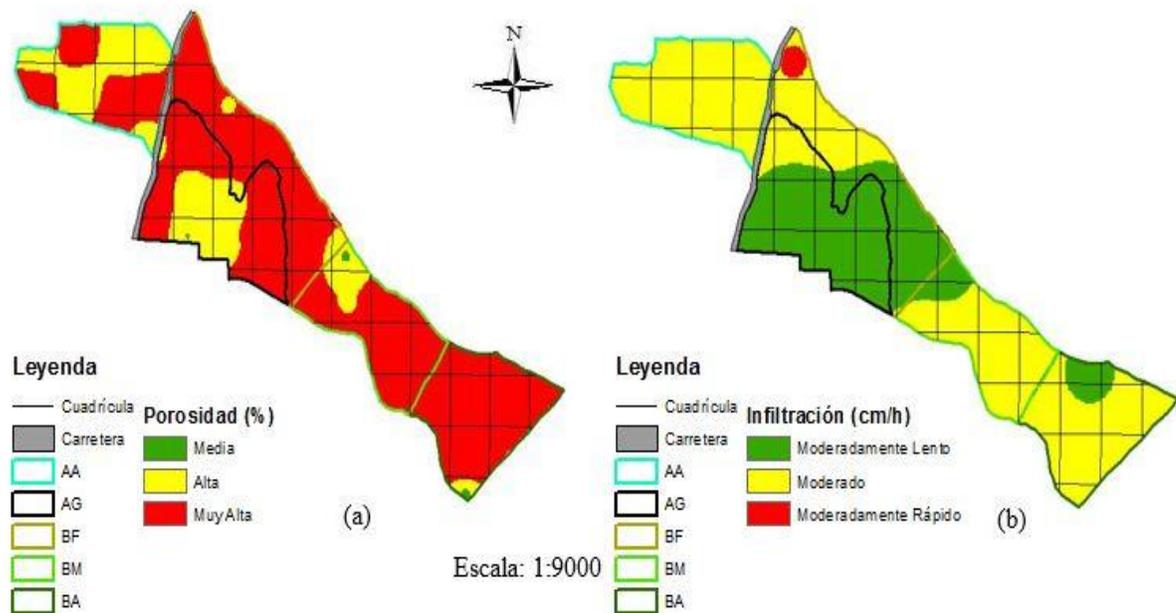


Figura 16. Mapas de la caracterización secundaria llevada a cabo en toda la finca: (a) Porosidad, (b) Infiltración.

De acuerdo con los datos, en FEIMA se observaron suelos con velocidades de infiltración asociadas con las categorías denominadas moderadamente lento, moderado y moderadamente rápido. En la zona agrícola se observó una velocidad de infiltración

moderada, en la zona de ganadería la velocidad fue moderadamente lenta y en el bosque se registraron las tres velocidades. Sin embargo, en este último sitio, se registraron velocidades moderadamente lentas y moderadas en BA y en BM mientras que en BF se registraron todas las categorías.

Los datos de respiración de suelo obtenidos en el bosque se encontraron en un rango de 35.0-61.7 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$, con un promedio de $46.3 \pm 10.0 \mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$ (ver Cuadro 10). Estudios previos [57] han comunicado valores de respiración de suelo en bosques de Turrialba (0-20 cm de profundidad) en un rango de 22.5-30.0 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$. Sin embargo, vale la pena mencionar que este parámetro es muy dependiente de la cantidad y calidad de materia orgánica, la temperatura, la humedad, la aireación y las características físicas del suelo [58]. En el presente estudio, por ejemplo, se encontraron diferencias en la respiración según materia orgánica ($P=0.02$), esperable al ser esta el componente primario para que se dé la oxidación y la elaboración de dióxido de carbono [59].

También, se observaron diferencias en la respiración según el lugar de muestreo dentro del bosque ($F(1,17)=6.35$, $P=0.01$). En la (Figura 18(a)) se muestra la distribución de la respiración del suelo en el parche boscoso, siendo la zona de BA la que presentó lo menores valores. Esto es interesante porque demuestra que tanto BF como BM estaría más protegidas de factores antrópicos [ver 60]. De forma similar la respiración fue diferente según la categoría textural ($F(1,17)=7.12$, $P=0.02$). Esto ya ha sido comunicado previamente [61] y se indicó que la porosidad o el contenido de humedad volumétrico, son responsables en las diferencias de respiración según la clase textural. Para el presente estudio es más probable

que las variaciones hayan estado relacionadas con el segundo ya que el suelo Franco Arenoso se encontró en un 60% de humedad (condición óptima para la respiración del suelo). Este tipo de suelo fue donde se observó el mayor valor de respiración con un promedio de 50.9 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$, mientras que en el suelo Franco el valor fue menor (37.2 $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$).

Cuadro 10. Parámetros estadísticos de la respiración del suelo $\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$ según lugar de muestreo dentro del parche boscoso de FEIMA (n=18).

Lugar de muestreo	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio(desviación)
BF	51.7	46.7	49.5 (2.6)
BM	46.7	43.4	45.0 (1.9)
BA	51.7	35.0	44.5 (8.6)

Los mixomicetos son habitantes comunes de ecosistemas forestales. Según los resultados, la zona BF tuvo el menor número de especies de estos microorganismos (Cuadro 11). A pesar de que las zonas BA y BM mostraron igual número de especies, fue en esa última donde la desviación fue menor.

Cuadro 11. Número de especies de mixomicetes registrados en FEIMA según zona dentro del parche boscoso(n=72).

Zonas del bosque	Promedio (desviación)	Máx.	Mín.
BA	10 (6)	14	6
BF	9 (2)	10	7
BM	10 (1)	11	9

Al calcular el índice de diversidad de Simpson, los valores promedio para las tres secciones del bosque correspondieron con 0.70 ± 0.20 , 0.76 ± 0.10 y 0.80 ± 0.00 para BA, BF y BM, respectivamente, lo que indicó que la diversidad es alta en las últimas dos y media en la

primera. En la (Figura 18(b)) se observa la distribución espacial de la diversidad de estos microorganismos.

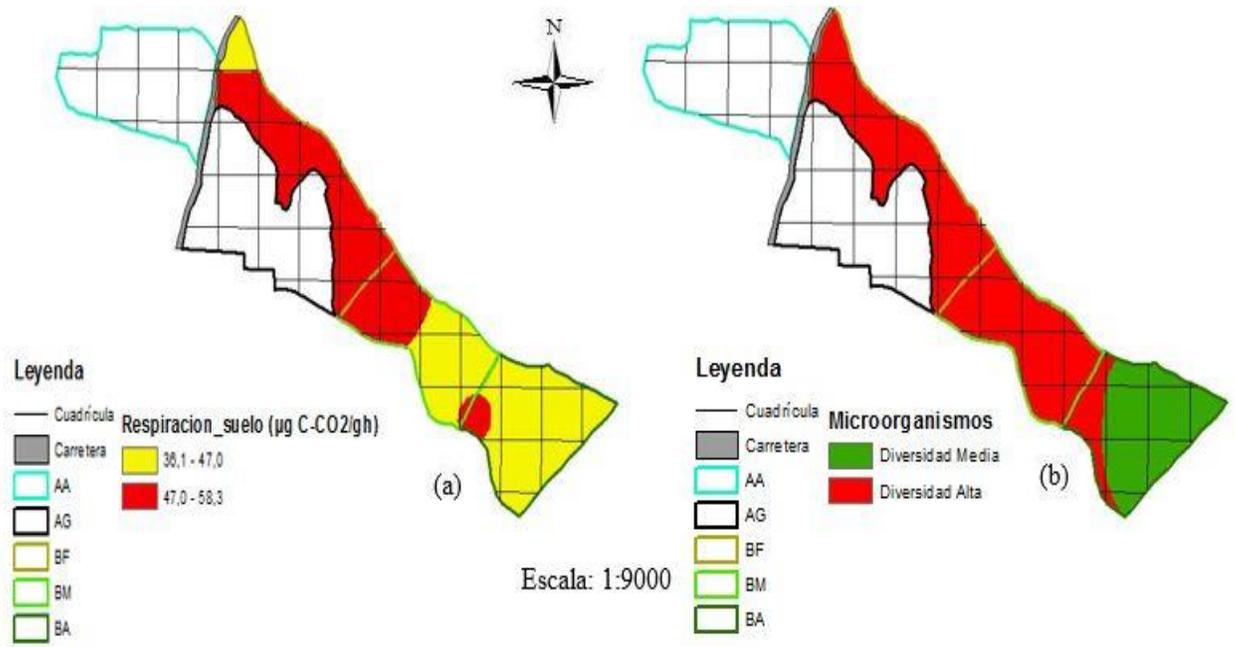


Figura 17. Mapa de la caracterización secundaria llevada a cabo en el parche boscoso: a) Respiración del Suelo, b) Mixomicetos.

Al calcular el índice de Chao 1, un indicador del potencial número de especies por encontrarse en un sitio [42], no se observaron diferencias en el potencial de las distintas zonas, a pesar de que BA tuvo el porcentaje más bajo de especies registradas según el modelo teórico. Lo anterior coincidió con la carencia de diferencias según puntos de muestreo ($F(1,5)=0.82, P=0.52$). Esto no es de extrañarse, si bien es cierto que la diversidad es sensible a las variaciones dentro del bosque, pareciera que, a este nivel, existe homogeneidad en los resultados.

Con respecto a los dictiostélidos, el número de colonias por gramo de suelo mostró diferencias significativas con relación a la zona del parche boscoso ($F(1,17)=7.32$, $P=0.06$). Estas diferencias eran esperables debido a la sensibilidad de estos microorganismos a pequeños cambios en las propiedades del suelo.

El promedio de colonias en BA, BM y BF fue de 750, 719 y 425, respectivamente. Estos valores son interesantes debido a que normalmente se reportan valores más pequeños (p.e. 219 para otros bosques de Costa Rica) [ver 62]. Sin embargo, se conoce también que las poblaciones de dictiostélidos en los suelos de América Central son los más diversos y activos registrados a nivel global [63]. Además, la capa superficial de humus de los suelos forestales y condiciones microambientales, favorecen el crecimiento de dictiostélidos [62]., por lo que tal resultado no es extraño.

En los Cuadros 12 y 13 se muestran los resultados del análisis de susceptibilidad a deslizamientos obtenido con datos de este proyecto. En particular, el factor litológico, la pendiente y la humedad del suelo, que en conjunto representan los factores pasivos en FEIMA fueron determinados efectivamente (Cuadro 11). De forma similar, en el Cuadro 12 se muestran los factores de lluvia máxima y el factor de sismicidad, que unidos representan los componentes activos en FEIMA.

Cuadro 12. Factores pasivos del índice de susceptibilidad a deslizamiento en FEIMA de la UCR en el Cantón de Turrialba, Costa Rica.

Factor Litológico(P_l)		
P_l	Litología	Características físico-mecánicas típicas
5	Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradiente hidrodinámicos muy elevados	Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos
Factor Pendiente(P_p)		
P_p	Condiciones de terreno	Pendiente
0	Planicie, sin denudación apreciable	0-2
1	Pendiente muy baja, peligro de erosión	2-7
2	Pendiente baja, peligro severo de erosión	7-15
3	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión.	15-30
4	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	30-70
Factor Humedad(P_h)		
P_h	Valor acumulado de índice de precipitación	Clasificación
2	5-9	Bajo
3	10-14	Medio
4	15-19	Alto

Cuadro 13. Factores activos del índice de susceptibilidad a deslizamiento en FEIMA de la UCR en el Cantón de Turrialba, Costa Rica.

Factor Lluvia Máxima(D_{ll})			
D_{ll}		Lluvia máxima 24 h, T=100	Clasificación
4		300-400	Alto
5		>400	Muy Alto
Factor Sismicidad(D_s)			
D_s	Intensidad MM	PGA (m/s^2) (Aceleración Sísmica)	Grado de susceptibilidad
5	VII	3.68-4.36	Medio
6	VIII	4.36-5.44	Elevado

Con estos datos se ha podido determinar (ver Figura 19) que el potencial de deslizamiento en FEIMA se encuentra en las categorías I, II, o sea muy bajo y bajo, respectivamente (ver Anexo 4). Con lo anterior, se determinó que la finca no presenta vulnerabilidad a deslizamientos. No obstante, en estudios realizados en Turrialba [64], se indica que este Cantón presenta actividad sísmica importante, donde se señala, que una de las situaciones geológicas que influyen a colaborar con la vulnerabilidad a deslizamientos es la compactación de rellenos, lo cual es el caso de FEIMA. Este factor podría ser compensado por el amarre que ofrecen las raíces, que el caso de esta finca puede ser alto al ser un sitio con suelos poco compactados (ver densidad aparente).

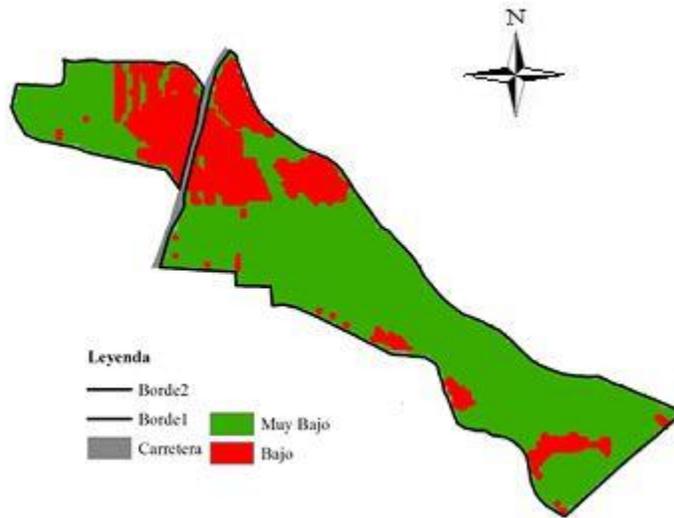


Figura 18. Mapa del Potencial de Deslizamiento en toda la finca.

Así, los sectores estables que no requieren medidas correctivas se encuentran principalmente en los sectores agrícolas, ganadero y en el bosque, especialmente en la zona cercana a la carretera principal. El resto de la finca, de igual manera, está caracterizado por estabilidad, pero se requerirían algunas medidas correctivas menores, en caso de obras de infraestructura de gran envergadura.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se determinaron cinco clases texturales en FEIMA, que, al tener gran influencia en las propiedades hidráulicas del suelo, permitió establecer que existe mayor disponibilidad de agua en textura media.

El 94.1% de las muestras del suelo evaluadas en FEIMA, presentó clases texturales francos o equilibrados.

La fertilidad del suelo en FEIMA, se encontró influenciada principalmente por la CICE y el %SA. Además, según resultados (ver Anexo 2), la finca en su totalidad presenta baja acidez.

Los agentes cromógenos o procesos de pedogénesis influyeron en el color del suelo. Lo anterior se observó en los resultados de coloración de suelo adecuados (ver Anexo 2), en donde las variables con mayor influencia fueron el contenido de MO y uso de suelo.

La densidad aparente de los suelos en el área de estudio, presenta valores adecuados (ver Anexo 2) para el desarrollo radicular de las plantas.

Los valores de porosidad (ver Anexo 2) se encontraron en su mayoría en un rango común y equilibrado, permitiendo una adecuada aireación del suelo y retención de agua. También, la variable física que más influyó en la porosidad fue la densidad aparente.

Las diferencias más marcadas entre la porosidad, uso de suelo y clase textural se dio en el AA, ya que la superficie del suelo se encuentra asociada a factores diferentes de manejo.

El uso y la textura del suelo, son los factores que más influyeron en las diferencias de la infiltración en FEIMA.

Las pruebas biológicas, mostraron que la respiración del suelo fue alta en el parche boscoso de la FEIMA.

Los dos grupos de micetozoos evaluados en el parche boscoso de la FEIMA, dieron resultados de alta diversidad.

El índice de deslizamiento en la FEIMA se encontró en bajo y muy bajo, debido principalmente por el factor pendiente.

El análisis de las variables respuesta en el sistema, muestra una adecuada relación entre el suelo y microorganismos.

Las variables analizadas en la FEIMA, visto como biosistema son suficientes para desarrollar un plan de manejo de los servicios ecosistémicos.

5.2 Recomendaciones

Para obtener las clases texturales en la investigación, se calculó a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla con el triángulo textural. Sin embargo, dependiendo de las posibilidades económicas con las que se cuente en proyectos futuros, sería muy bueno utilizar las pruebas

del hidrómetro y la prueba de sedimentación (ASTM D422 Y ASTM E100), especialmente para la separación de partículas finas del suelo.

El color del suelo se hizo en condición húmeda, mediante la utilización de la Tabla Munsell, sin embargo, es recomendable obtener el color en condición seca también. Además, para que el color del suelo no varíe respecto a la humedad de este, es aconsejable realizar la prueba a capacidad de campo.

Los lineamientos de fertilidad del suelo que se siguieron en la metodología fueron en su mayoría para suelos con condición agrícola, y especialmente dedicados a producción de café. De esta manera es muy importante estudiar las condiciones o necesidades de nutrimentos para diferentes cultivos que se quieran desarrollar en la finca, especialmente en el parche boscoso de acuerdo con las especies de los árboles y en el área de ganadería, para un adecuado desarrollo del sistema silvopastoril. Lo anterior, muestra la necesidad de desarrollar un mapa de capacidad de uso del suelo en FEIMA en proyectos futuros.

Para mantener las condiciones de las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, infiltración) que se dieron en el presente proyecto, es importante realizar buenas prácticas agrícolas, rotación del ganado en las diferentes parcelas, y una adecuada delimitación de los senderos en el bosque para reducir al máximo el área afectada por intervención del ser humano.

Para estudios posteriores, sería bueno aumentar el número de muestras de las variables biológicas y de infiltración, con el fin de aumentar la sensibilidad de los análisis. De igual

forma, se recomienda utilizar los datos del presente estudio como línea base para monitoreo de variables de suelo en el contexto de proyectos de cambio climático y uso de la tierra.

Si se desea la clasificación del suelo en la FEIMA, es necesario datos más particulares a nivel de suelo (p.e. calicatas). Con la finalidad de conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas en los horizontes para dar un diagnóstico acertado.

Si se desea utilizar el parche boscoso de la FEIMA en futuros proyectos agroforestales, es necesario considerar la perturbación mínima del suelo, para evitar la liberación de CO₂ al medio ambiente. De no ser así, lo anterior, contribuiría al incremento del Cambio Climático, debido a que los resultados reflejan gran cantidad de CO₂ almacenado en la matriz superficial del suelo.

6. REFERENCIAS

1. García Y, Ramírez W, Sánchez Saray. Indicadores de la Calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35(2): 1-14.
2. Cruz BA, Castorena GC, Sánchez CR, Barra EJ. Cronosecuencia de un suelo y su clasificación en un área originalmente ocupada por Bosque Mesófilo de Montaña. *Terra Latinoamericana* 23(2): 1-12.
3. Rubio Gutiérrez AM. La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales. [Internet]. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS): Universidad de Sevilla; 2010 [citado 20 jun 2017]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/57951>
4. Programa REDD/CCAD-GIZ-SINAC. Inventario Nacional Forestal de Costa Rica 2014-2015. [Internet]. Preparado por: Emanuelli P, Milla F, Duarte E, Emanuelli J, Jiménez A, Chavarría MI. San José: Programa Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal en Centroamérica y la República Dominicana (REDD/CCAD-GIZ); 2015. [citado 18 jun 2019]. Disponible en: <http://www.sirefor.go.cr/?p=1170>
5. FAO: Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. 2nd ed. Roma: FAO; 2016 [citado 19 jun 2019]. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/current-assessment/es/>
6. García Merino A. Extracción de biomasa en los suelos forestales, principales variables a tener en cuenta para evitar la degradación del suelo. *Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 25: 23-32.
7. FAO: Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. Roma: FAO; c2009 [citado 20 jun 2017]. Guía para descripción de suelos. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>

8. CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas [Internet]. San José: CIA; c2013 [actualizado 3 ago 2016; citado 20 jun 2017]. Mapa Digital de Suelos de Costa Rica. Disponible en: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
9. USDA-NRCS: United States Department of Agriculture- Natural Resource Conservation Service. Soil Health at NRCS. [Internet]. Washington, DC: USDA; 2017. [citado 15 abr 2018]. Disponible en: https://www.usda.gov/oce/forum/past_speeches/2017/2017_Speeches/Bianca_Moebius-Clune.pdf
10. Forsythe W. Física de Suelos: Manual de Laboratorio. 1a ed. 2a reimpresión. San José C.R: IICA. 212p; 1985.
11. Soil Science Division Staff. Soil Survey Manual. 18a ed. Washington, D.C: Government Printing Office; 2017
12. ASA: American Society of Agronomy, SSSA: Soil Science Society of America. Soil Respiration. En: Keeney RD, Dinauer CR, Buxton RD, et al, editores. Methods of Soil Analysis. 2a ed. Wisconsin USA: Chief ASA Publications; 1982.p. 831-866,
13. USDA-NRCS: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. [Internet]. Washington: USDA; 1999. [citado 16 abr 2018]. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
14. Loynachan ET, Brown WK, Cooper HT, Milford HM. Sustaining our Soils and Society. [Internet]._Virginia: American Geological Institute; 1999. [citado 16 abr 2018]. Disponible en: [http://www.envirothon.org/files/2014/1_Sustaining%20Our%20Soils%20and%20Society%20\(2\).pdf](http://www.envirothon.org/files/2014/1_Sustaining%20Our%20Soils%20and%20Society%20(2).pdf)
15. Guyer HE, Rojas PA, Rollins AW, Rojas C. 2017. Mycetozoan incidence in soils and their potential for ecosystem quality assessment. CREAM 7, 322-330.

16. USDA-NRCS: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Clave para la Taxonomía de Suelos. [Internet]. 12a ed. Texcoco Estado de México: 2014. [citado 17 abr 2018]. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
17. Jaramillo J, Daniel F. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2002.
18. Villars T, USDA-NRCS: United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. Vermont Soil and Land Judging Manual. [Internet]. Vermont: NRCS; 2006. [citado 17 abr]. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_010159.pdf
19. Hipple WK. Washington Soil Atlas. [Internet]. Washington: NRCS; 2011. [citado 18 abr]. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_034094.pdf
20. FAO: Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. Roma: FAO; c2009 [citado 20 jun 2017]. Guía para Mapa Digital de Suelos de Costa Rica a descripción de suelos. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
21. Bockheim GJ, Hartemink EA. 2017. Soil Forming Factors. En: Bockheim GJ, Hartemink EA (Eds). The Soils of Wisconsin. Nueva York: Springer pp. 1-33.
22. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. Buenas Prácticas en la Elaboración de Mapas de Suelos. 1a ed. San José: ComuniICA; 2016.
23. Jaramillo J, Daniel F. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2002.

24. Rucks L, García F, Kaplán A, León PJ, Hill M. Propiedades Físicas del Suelo. [Internet]. Montevideo: Unideversidad de la República; 2004. [citado 20 abr 2019]. Disponible en: <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
25. Angella G, Frías C, Salgado R. Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. [Internet]. Santiago del Estero: INTA; 2016.
26. Ingaramo OE, Paz Ferreiro J, Mirás Ávalos JM, Vidal Vázquez E. 2007. Caracterización de las propiedades generales del suelo de una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. Cuadernos Laboratorio Xeoloxico de Laxe, 32: 127-137.
27. Phogat VK, Tomar VS, Dahiya Rita. Soil Physical Properties. En: Soil Science: An Introduction. Rattan R.K., Katyal J.C., Dwivedi BS, Sarkar AK, Bhattachatyya T, Tarafdar JC, Kukal SS. (Eds). Indian Society of Soil Science. pp.135-171
28. Hillel D. Environmental soil physics. San Diego USA: Academic Press; 1998.
29. USDA-NRCS: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos-Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Chemical Indicators and Soil Functions. [Internet]. Washington: 2015. [citado 21 abr 2018]. Disponible en: <https://usdasearch.usda.gov/search?utf8=%E2%9C%93&affiliate=usda&query=Chemical+Indicators+and+Soil+Functions+>
30. Carvajal RR. Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los Suelos. [Internet]. 1a ed. Bogotá: Produmedios; 1997. [citado 21 abr 2019]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>
31. Rossiter GD. Methodology for Soil Resource Inventories. [Internet]. 2da ed. Enschede: Soil Science Division; 2000. [citado 21 abr 2019]. Disponible en: http://www.css.cornell.edu/faculty/dgr2/teach/ssm/SSM_LectureNotes2.pdf

32. Castillo BG, Sotela BO, Roman NO. 2011. Efectividad de la Metodología Mora-Vahrson Modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona. *Revista Geográfica de América Central* 2(47): 141-162.
33. Chinchilla MR, Castro MS, Vahrson WG. Mapa de amenaza de deslizamientos. [Internet]. San José: CEPREDENAC; 1994. [citado 22 abr 2019]. Disponible en: <https://www.worldcat.org/title/mapa-de-amenaza-de-deslizamientos-valle-central-costa-rica/oclc/61280324>
34. INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censo. Características Sociales y Demográficas CENSO 2001. [Internet]. 1er ed. San José: INEC; 2012. [citado 20 may 2019]. Disponible en: http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos/inec_institucional/estadisticas/resultados/reoblaccenso2011-10.pdf.pdf
35. Jiménez M, Tapia A, Riggioni R, Coto E. Estadísticas Relevantes de Turrialba Situación del Cantón al 2012. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
36. Muñoz MB: Métodos analíticos del laboratorio de suelos [Internet]. 5ta ed. Bogotá: IGAC; 1990 [citado 25 ene 2018]. Disponible en: <http://www.worldcat.org/title/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos/oclc/318262888/editions?referer=di&editionsView=true>
37. Mclean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. En Page AL, Miller, RH, Keeney, R (Eds). *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy. pp. 199-224.
38. Méndez CJ. Bertsch F. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 2 ed. San José: Centro de Investigaciones Agronómicas; 2012
39. Al Shammery GA, Kouzani ZA, Kaynak A, Khoo YS, Norton M, Gates W. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. *Pedosphere* 28(4): 1-17.

40. Batres AC, Palomo BM. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal* 9(1): 1-12.
41. Escalante RE. ¿Cómo hacer pruebas de infiltración? [Internet]. Cartago: CFIA; [citado 10 feb 2019]. Disponible en: <http://www.cfia.or.cr/descargas/infiltracion.pdf>
42. Moreno CE. Métodos para medir la biodiversidad [Internet]. vol1.1a ed. Pachuca: Sociedad Entomológica Aragonesa; 2001. [citado 19 abr 2019]. Disponible en: <http://entomologia.rediris.es/sea/manytas/metodos.pdf>
43. FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. Roma: FAO; [citado 23 mar 2019]. Textura del Suelo; [aprox. 2 pantallas]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#top
44. Alvarado A, Forsythe W. Variación de la densidad aparente en Órdenes de suelos de Costa Rica. 2005; 29(1):85–94.
45. Jiménez SA, Khalajabadi SS. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4): 381-397.
46. Delgadillo FL, Martínez Alcalá EJ. Manual de Procedimientos Analíticos. [Internet]. Ciudad de México: Editorial UNAM; 2010. [citado 25 mar 2019]. Disponible en: https://www.unam.mx/resultados?as_q=Manual%20de%20Procedimientos%20Anal%3%ADticos%20
47. CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas, Amino Grow International, Molina E. Análisis de Suelos y su Interpretación. [Internet]. San José. [citado 26 mar 2019]. Disponible en: <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>

48. Soto Domínguez MJ, Gutiérrez Román DA, García PF, Sandoval AO. Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(1):141-155.
49. Ramírez Herrera AD (et al). Evaluación de Requerimientos Nutricionales en Vivero de Especies Tropicales empleadas en Silvicultura Urbana. EIA [Internet]. 2014 [citado 20 jun 2019]; 11(21): 41-54. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n21/n21a04.pdf>
50. Hilario RF. Importancia y ventajas de *Erythrina* sp. en Sistemas Agroforestales. *Xilema*. 2010; 23. 54-55.
51. Alvarado A, Raigosa J. Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales. [Internet]. 1era ed. San José, Costa Rica. [citado 20 jun 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/324165376>
52. Presidente de la República; Ministerio de Agricultura y Ganadería; Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas. Metodología Determinación Capacidad Uso tierras Costa Rica. San José: Sistema Costarricense de Información Jurídica; 1988. [citado 26 mar 2019]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=17871&nValor3=69087&strTipM=TC
53. USDA-NRCS: United States Department of Agriculture. Soil Bulk Density/Moisture/Aeration [Internet]. In: University of Nebraska-Lincoln. Soil Health Clinic. Nebraska: Institute of Agriculture and Natural Resources; 2018. p .26-36. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053260.pdf
54. Ulloa Calvache MA. Física de Suelos y su Relación con los Problemas Ambientales. [Internet]. Ecuador: 2010 [citado 27 mar 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313640535_fisica_de_suelos_y_su_relacion_con_los_problemas_ambientales

55. FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Base referencial mundial del recurso suelo. [Internet]. IUSS Working Group WRB; 2014. [actualizado 2015, citado 26 mar 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/search/es/?cx=018170620143701104933%3Aqq82jsfba7w&q=Base+Referencial+Mundial+del+recurso+suelo&cof=FORID%3A9&siteurl=www.fao.org%2Fhome%2Fes%2F&ref=www.google.com%2F&ss=16290j10076028j62>
56. Delgadillo O, Pérez L. Medición de la infiltración del agua en el suelo: Método de la doble anilla. [Internet]. Cochabamba Bolivia: Centro Agua; 2016. [citado 09 abr 2019]. Disponible en: <http://www.centro-agua.umss.edu.bo/serie-tecnica/>
57. Durango W, Uribe L, Henríquez C, Mara R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque den Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1): 1-10.
58. USDA-NRCS: United States Department of Agriculture. Soil Respiration [Internet]. In: University of Nebraska-Lincoln. Soil Health Clinic. Nebraska: Institute of Agriculture and Natural Resources; 2018. p .46-55. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053267.pdf
59. Hinostroza A, Malca J, Suárez L. 2016. Dinámica de la biomasa microbiana y su relación con la respiración y el nitrógeno del suelo en tierras agrícolas en el valle del Mantaro. *Ciencia y Desarrollo* 16(1): 1-15.
60. Raich WJ. 1998. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forest. *Forest Ecology and Management* 107: 309-318.
61. USD-NRCS: United States Department of Agriculture, University of Nebraska Lincoln. Physical, Chemical, and Biological Properties of soil [Internet]. Nebraska: University of Nebraska-Lincoln; 2015. [citado 17 abr 2019]. Disponible en: <https://ardc.unl.edu/2015%20Soils%20Notebook%20Final.pdf>

62. Landolt CJ, Stephenson LS, Cavender CJ, Romeralo M. 2014. Costa Rican distyostelids, with notes on the taxonomy, phylogeny and ecology of *Dictyostelium discoideum*. *Sydowia*. 66(1): 129-142.
63. Swanson RA, Vadell ME, Cavender CJ. 1999. Global Distribution of Forest Soil Dictyostelids. *Journal of Biogeography* 26(1): 133-148.
64. CNE: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Amenazas de Origen Natural Cantón de Turrialba. San José: 2016. [actualizado 10 May 2016; citado 15 may 2019]. Disponible en: https://www.cne.go.cr/index.php/prevencie-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas/search_result?search_phrase=Turrialba&catid=0&ordering=newest&search_mode=any&search_where%5B%5D=search_name&search_where%5B%5D=search_descriptio n
65. Chinchilla MR. Evaluación de la Susceptibilidad al Deslizamiento del Cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. [Internet]. San José: UCR; 2004. [citado 12 feb 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/242245217_evaluacion_de_la_susceptibilidad_al_deslizamiento_del_canton_de_san_jose_provincia_de_san_jose_costa_rica
66. Castillo BG. Lecciones Aprendidas en Gestión de Riesgos a Deslizamientos: caso Zonificación de Susceptibilidad por Deslizamiento en Cuenca, Ecuador. ResearchGate [Internet]. 2010 [citado 05 mar 2019]; 1(1): 1-25. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/284733045_Lecciones_aprendidas_en_gestion_d el_riesgo_de_deslizamientos_caso_zonificacion_de_susceptibilidad_por_deslizamientos_e n_Cuenca_Ecuador
67. Molina Chaverri FI. Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica. [Internet]. [Tesis Licenciatura] Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2016. [citado 05 mar 2019] Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7054>

68. Denyer P, Kussmaul S. Deslizamientos:Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana. [Internet]. 1a ed. Cartago: Tecnológica de Cartago; 1994. [citado 05 mar 2019]. Disponible en: <https://searchworks.stanford.edu/view/2893233>

69. BGR: Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales, INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Nicaragua: El Método Mora-Vahrson. [Internet]. Nicaragua: Dirección General de Geofísica; 2012: [citado 06 mar 2019]. Disponible en: https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/desliza/estudios/Mora_Vahrson.pdf

ANEXOS

1. Tipo de levantamiento de suelos de acuerdo con el nivel de detalle

Cuadro 14. Esquema de selección del tipo de mapa de suelos según su escala.

Tipo de levantamiento	Escala de publicación	Detalle
Detallado	1:5000 a 1:20000	Aplicados a usos muy intensivos que requieren de una información detallada. Aplicados, además en levantamientos de microcuencas para planificar riego y drenaje, para identificar áreas de conservación o recreación. En todos estos ejemplos, se requieren un conocimiento muy preciso y detallado de los suelos y de su variabilidad espacial.
Semidetallado	1:20000 a 1:50000	Utilizados para usos de tierras que no requieren un conocimiento tan preciso como el necesario en áreas pequeñas en superficie. La información puede ser utilizada en la planificación de la agricultura en general, cultivos específicos, ganadería, forestales, zonificaciones por cuencas.

2. Resultados de las variables físicas, químicas y biológicas de suelo, estudiadas en FEIMA.

Cuadro 15. Resultados del porcentaje de arena, limo, arcilla y las clases texturales en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	Bloque	Arena(%)	Limo(%)	Arcilla(%)	Clase Textural
A	1	43	52	4	Franco Limoso
	2	82	14	5	Areno Franco
B	1	48	48	5	Franco Arenoso
	2	87	9	4	Arenoso
C	1	57	38	5	Franco Arenoso
	2	48	48	5	Franco Arenoso
	3	67	29	5	Franco Arenoso
D	1	50	41	9	Franco Franco
	2	68	23	9	Arenoso
	3	46	50	4	Franco Limoso
	4	36	54	11	Franco Limoso
	5	48	48	4	Franco Arenoso
E	1	76	19	5	Franco Arenoso
	2	48	48	4	Franco Arenoso
	3	71	24	5	Arenoso
	4	38	54	8	Franco Limoso
	5	59	36	5	Franco Arenoso
F	2	64	32	5	Franco Arenoso
	3	73	23	5	Franco Arenoso
	4	43	52	4	Franco Limoso
	5	42	54	4	Franco Limoso
	G	3	81	14	5

	4	46	50	4	Franco Limoso
	5	63	29	8	Franco Arenoso
	6	71	24	5	Franco Arenoso
H	4	63	33	4	Franco Arenoso
	5	75	20	5	Areno Franco
	6	71	24	5	Franco Arenoso
I	5	71	24	5	Franco Arenoso
	6	48	48	5	Franco Arenoso
	7	52	43	5	Franco Arenoso
J	6	62	33	5	Franco Arenoso
	7	48	44	8	Franco Franco
	8	76	19	5	Arenoso
K	7	71	24	5	Franco Arenoso
	8	52	43	5	Franco Arenoso
	9	71	24	5	Franco Arenoso
L	7	48	33	19	Franco
	8	52	38	10	Franco
	9	80	12	8	Areno Franco
	10	76	19	5	Areno Franco
M	7	60	32	8	Franco Arenoso
	8	60	35	5	Franco Arenoso
	9	57	38	5	Franco Arenoso
N	8	48	48	5	Franco Arenoso

Cuadro 16. Resultados del color de suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	Bloque	Color	Descripción
A	1	7.5YR 2/3	Marrón muy oscuro
	2	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
B	1	7.5YR 3/4	Marrón oscuro
	2	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
C	1	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
	2	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
	3	7.5YR 4/4	Café
D	1	7.5YR 2/3	Marrón muy oscuro
	2	7.5YR 3/4	Marrón oscuro
	3	7.5YR 2/2	Negro Parduzco
	4	7.5YR 2/3	Marrón muy oscuro
	5	7.5YR 3/2	Negro Parduzco
E	1	7.5YR 3/1	Negro Parduzco
	2	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
	3	7.5YR 3/2	Negro Parduzco
	4	10YR 3/3	Café oscuro
	5	10YR 3/3	Café oscuro
F	2	7.5YR 3/2	Negro Parduzco
	3	10YR 3/2	Negro Parduzco
	4	10YR 3/4	Café oscuro
	5	7.5YR 2/3	Marrón muy oscuro
G	3	10YR 3/3	Café oscuro
	4	10YR 3/3	Café oscuro
	5	10YR 3/2	Negro Parduzco
	6	10YR 3/4	Café oscuro
H	4	7.5YR 3/3	Marrón oscuro
	5	10YR 2/3	Negro Parduzco
	6	10YR 3/3	Café oscuro
I	5	10YR 4/4	Café
			Gris amarillento marrón
	7	7.5YR 3/2	Negro Parduzco
J	6	10YR 4/4	Café
	7	10YR 3/3	Café oscuro
	8	10YR 2/3	Negro Parduzco

K	7	10YR 3/3	Café oscuro
	8	10YR 4/4	Café
	9	10YR 3/2	Negro Parduzco
L	7	10YR 4/2	Gris amarillento marrón
	8	10YR 3/3	Café oscuro
	9	10YR 3/2	Negro Parduzco
	10	10YR 3/1	Negro Parduzco
M	7	10YR 3/3	Café oscuro
	8	10YR 4/2	Gris amarillento marrón
	9	10YR 3/2	Negro Parduzco
N	8	10YR 3/3	Café oscuro

Cuadro 17. Resultados de los parámetros de acidez del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	pH(H ₂ O)	ACIDEZ	SA (%)	CICE
10L	5.9	0.1	0.5	22.2
1 ^a	6.3	0.1	0.7	16.6
1B	5.9	0.2	1.1	16.9
1C	5.3	0.2	1.0	17.8
1D	5.4	0.2	1.2	17.3
1E	5.9	0.1	0.6	22.0
2 ^a	5.2	1.6	10.7	15.0
2B	5.8	0.2	1.4	15.1
2C	5.9	0.1	0.6	20.0
2D	5.6	0.4	2.5	17.6
2E	4.9	1.0	5.8	17.1
2F	6.2	0.1	0.6	18.8
3C	5.9	0.1	0.6	20.8
3D	6.3	0.1	0.6	24.1
3F	6.6	0.1	0.4	23.1
3G	6.9	0.1	0.5	22.4
3E	5.9	0.1	0.6	22.3
4D	6.2	0.1	0.5	20.5
4E	6.6	0.1	0.4	22.0
4F	6.5	0.1	0.4	22.5

4G	6.5	0.1	0.6	20.2
4H	6.1	0.1	0.7	16.4
5D	5.8	0.1	0.6	20.7
5E	6.3	0.1	0.5	25.3
5F	6.3	0.3	1.3	23.7
5G	6.5	0.1	0.5	18.5
5H	5.8	0.1	0.7	17.7
5I	5.6	0.2	1.3	18.2
6G	6.3	0.1	0.7	18.4
6H	6.6	0.1	0.5	22.8
6I	6.1	0.1	0.7	18.4
6J	5.8	0.1	0.6	20.7
7I	6.2	0.1	0.7	17.8
7J	6.2	0.1	0.5	24.3
7K	5.7	0.2	1.5	15.8
7L	5.8	0.1	0.8	16.5
7M	6.2	0.1	0.6	19.1
8J	6.2	0.1	0.8	15.9
8K	5.7	0.2	1.0	17.4
8L	5.8	0.1	0.5	22.3
8M	6.1	0.1	0.6	17.9
8N	5.9	0.2	1.3	16.4
9K	6.6	0.1	0.7	16.8
9L	5.6	0.2	1.0	17.4
9M	5.9	0.1	0.7	17.5

Cuadro 18. Resultados de las bases del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	Ca (cmol(+)/L)	Mg (cmol(+)/L)	K (cmol(+)/L)
10L	17.1	4.8	0.2
1 ^a	12.6	3.6	0.3
1B	10.2	6.4	0.1
1C	12.5	5.0	0.2
1D	13.7	3.1	0.3
1E	16.0	5.8	0.1
2 ^a	10.9	2.3	0.2

2B	10.0	4.7	0.1
2C	13.1	6.1	0.7
2D	10.0	7.0	0.2
2E	11.3	4.7	0.1
2F	13.1	4.8	0.7
3C	12.6	7.5	0.7
3D	14.2	9.5	0.3
3F	13.5	9.1	0.5
3G	13.9	7.8	0.5
3E	13.4	8.1	0.7
4D	13.7	6.6	0.1
4E	13.7	7.7	0.6
4F	13.8	8.4	0.2
4G	10.8	8.5	0.8
4H	10.8	4.0	1.4
5D	15.0	5.4	0.2
5E	13.6	11.5	0.1
5F	12.9	10.3	0.2
5G	11.8	4.9	1.7
5H	12.5	4.4	0.7
5I	11.0	6.9	0.1
6G	11.2	6.7	0.4
6H	15.3	7.0	0.4
6I	12.7	5.4	0.2
6J	14.8	5.5	0.4
7I	14.0	3.5	0.3
7J	17.0	6.9	0.3
7K	12.0	3.2	0.4
7L	10.1	5.8	0.5
7M	12.2	6.2	0.6
8J	10.3	5.1	0.3
8K	12.3	4.5	0.4
8L	16.1	5.9	0.1
8M	12.7	4.9	0.1
8N	11.2	4.7	0.4
9K	9.0	6.7	1.0
9L	12.5	4.3	0.4
9M	12.2	4.7	0.5

Cuadro 19. Resultados de las relaciones catiónicas del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	Ca/Mg	Ca/K	(Ca+Mg)/K	Mg/K
10L	3.6	71.2	91.0	19.9
1 ^a	3.5	50.4	64.8	14.4
1B	1.6	92.9	151.3	58.4
1C	2.5	73.3	102.9	29.6
1D	4.4	42.9	52.5	9.7
1E	2.8	122.8	167.3	44.5
2 ^a	4.7	68.2	82.8	14.6
2B	2.1	100.4	147.8	47.4
2C	2.1	17.6	25.9	8.2
2D	1.4	62.3	106.1	43.8
2E	2.4	81.0	114.2	33.2
2F	2.7	18.5	25.3	6.8
3C	1.7	18.5	29.4	11.0
3D	1.5	41.7	69.6	27.9
3F	1.5	28.7	47.9	19.3
3G	1.8	26.7	41.8	15.1
3E	1.7	18.1	29.0	10.9
4D	2.1	97.9	144.9	47.0
4E	1.8	23.6	36.8	13.2
4F	1.7	69.1	110.9	41.8
4G	1.3	13.5	24.1	10.7
4H	2.7	7.8	10.7	2.9
5D	2.8	71.5	97.1	25.7
5E	1.2	104.7	192.9	88.2
5F	1.2	58.4	105.4	47.0
5G	2.4	7.0	9.9	2.9
5H	2.8	17.3	23.5	6.2
5I	1.6	91.7	148.8	57.2
6G	1.7	32.1	51.4	19.3
6H	2.2	38.4	55.8	17.5
6I	2.4	63.7	90.7	27.0
6J	2.7	42.3	57.9	15.6
7I	4.0	48.1	60.0	11.9
7J	2.5	68.0	95.6	27.6
7K	3.8	31.6	40.0	8.3

7L	1.7	20.1	31.8	11.7
7M	2.0	19.7	29.7	10.0
8J	2.0	34.3	51.5	17.1
8K	2.7	29.4	40.1	10.8
8L	2.7	115.2	157.2	42.0
8M	2.6	91.0	126.3	35.3
8N	2.4	31.0	44.1	13.1
9K	1.3	9.1	15.9	6.8
9L	2.9	33.9	45.5	11.6
9M	2.6	26.0	36.0	9.9

Cuadro 20. Resultados del P y micronutrientes del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	P (mg/l)	Zn (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
10L	15.0	5.7	5.0	192.0	13.0
1 ^a	10.0	2.7	21.0	176.0	43.0
1B	6.0	3.3	12.0	131.0	26.0
1C	3.0	3.1	17.0	143.0	80.0
1D	14.0	3.0	16.0	211.0	64.0
1E	2.0	3.8	12.0	99.0	23.0
2 ^a	1.0	2.1	14.0	153.0	117.0
2B	2.0	2.9	22.0	159.0	144.0
2C	5.0	3.1	17.0	185.0	47.0
2D	5.0	2.3	10.0	186.0	57.0
2E	5.0	6.0	22.0	308.0	85.0
2F	13.0	3.0	15.0	180.0	22.0
3C	8.0	2.6	13.0	104.0	51.0
3D	6.0	1.5	11.0	64.0	20.0
3F	8.0	1.4	13.0	66.0	14.0
3G	14.0	3.0	17.0	74.0	10.0
3E	11.0	3.1	24.0	294.0	45.0
4D	3.0	2.6	20.0	150.0	31.0
4E	5.0	1.7	16.0	75.0	33.0
4F	9.0	1.5	14.0	83.0	22.0
4G	8.0	1.6	20.0	191.0	28.0
4H	35.0	3.4	23.0	309.0	31.0
5D	9.0	7.4	12.0	121.0	46.0

5E	8.0	9.1	19.0	160.0	55.0
5F	11.0	3.0	18.0	96.0	20.0
5G	18.0	3.9	23.0	264.0	20.0
5H	6.0	5.3	15.0	158.0	55.0
5I	7.0	4.1	8.0	119.0	46.0
6G	9.0	3.4	18.0	170.0	84.0
6H	11.0	2.7	12.0	84.0	23.0
6I	10.0	3.2	15.0	190.0	35.0
6J	7.0	3.7	18.0	221.0	24.0
7I	10.0	2.2	9.0	226.0	47.0
7J	3.0	2.5	9.0	51.0	38.0
7K	17.0	2.1	13.0	318.0	37.0
7L	10.0	3.2	22.0	251.0	29.0
7M	15.0	2.4	21.0	257.0	44.0
8J	9.0	2.8	15.0	168.0	40.0
8K	12.0	3.8	7.0	220.0	27.0
8L	5.0	3.9	11.0	105.0	35.0
8M	8.0	2.4	13.0	223.0	14.0
8N	8.0	3.6	16.0	202.0	28.0
9K	10.0	2.6	24.0	224.0	35.0
9L	9.0	4.0	14.0	223.0	108.0
9M	11.0	3.7	20.0	236.0	41.0

Cuadro 21. Resultados de la densidad aparente y porosidad del suelo en las diferentes parcelas de FEIMA.

Parcela	Bloque	Da(g/cm ³)	Porosidad (%)
A	1	1.2	55.3
	2	0.9	66.1
B	1	1.0	62.7
	2	1.2	56.5
C	1	1.1	59.6
	2	1.0	60.4
	3	1.0	61.0
D	1	1.3	50.6
	2	0.9	64.7
	3	1.2	56.0
	4	0.8	69.9

	5	0.9	67.1
E	1	0.9	66.7
	2	0.9	64.6
	3	1.0	62.3
	4	1.2	54.9
	5	1.3	49.8
F	2	1.1	59.0
	3	0.7	74.8
	4	1.2	54.5
	5	1.1	58.7
G	3	1.1	60.2
	4	0.9	66.2
	5	1.0	63.0
	6	0.8	70.2
H	4	0.7	73.9
	5	1.0	62.1
	6	1.0	60.9
I	5	1.3	49.1
	6	1.1	58.9
	7	1.0	64.1
J	6	0.9	65.6
	7	0.9	67.5
	8	1.0	62.0
K	7	1.0	61.8
	8	0.8	71.2
	9	0.9	64.4
L	7	0.9	67.0
	8	0.9	66.0
	9	0.6	77.7
	10	1.4	48.2
M	7	0.6	76.0
	8	1.0	62.6
	9	0.8	68.5
N	8	1.0	62.6

Cuadro 22. Resultados de infiltración del suelo en cuatro parcelas de FEIMA.

Parcela	Infiltración (mm/día)										
4E	2639.1	1044.6	710.9	409.1	333.9	235.0	198.0	227.2	71.8	157.3	43.3
7L	4750.3	2743.6	887.3	935.2	579.9	499.5	278.4	764.8	380.4	288.8	427.9
7K	8274.2	3263.2	1058.5	753.1	606.0	670.6	529.5	181.2	773.3	256.4	227.0
5I	6817.5	1749.7	865.9	691.6	438.1	464.7	592.8	345.2	517.4	348.9	282.8

Cuadro 23. Resultados de respiración del suelo en seis parcelas del bosque de FEIMA.

Parcela	Replicas	$\mu\text{g C-CO}_2/\text{gh}$
1E	1	41.70
	2	41.70
	3	38.36
2E	1	55.04
	2	61.72
	3	58.38
6I	1	55.04
	2	55.04
	3	51.71
8K	1	35.03
	2	55.04
	3	61.72
7J	1	38.36
	2	35.03
	3	35.03
8L	1	35.03
	2	38.36
	3	41.70

Cuadro 24. Resultados de microorganismos en el suelo en cinco parcelas del bosque de FEIMA.

Parcela	Bloque	Especies	Mixomicetos		Dictiostélidos	
			Registros	Simpson_1-D	Chao-1	Especies
E	1	10.00	19.00	0.81	13.75	375.00
	2	7.00	29.00	0.70	8.00	475.00
I	6	11.00	25.00	0.80	14.75	750.00
J	7	9.00	28.00	0.80	10.00	688.00
K	8	14.00	29.00	0.84	23.00	1000.00
L	8	6.00	24.00	0.56	12.00	500.00

Cuadro 25. . Resultados de las propiedades de humedad del suelo en FEIMA.

Parcela	Bloque	CC (%)	PMP (%)	CRAD (%)
A	1	31.70	13.50	18.20
	2	12.90	6.20	6.70
B	1	18.70	8.60	10.10
	2	11.80	6.70	5.10
C	1	18.70	8.60	10.10
	2	18.70	8.60	10.10
	3	18.70	8.60	10.10
D	1	28.50	13.60	14.90
	2	18.70	8.60	10.10
	3	31.70	13.50	18.20
	4	31.70	13.50	18.20
	5	18.70	8.60	10.10
E	1	18.70	8.60	10.10
	2	18.70	8.60	10.10
	3	18.70	8.60	10.10
	4	31.70	13.50	18.20
	5	18.70	8.60	10.10
F	2	18.70	8.60	10.10
	3	18.70	8.60	10.10
	4	31.70	13.50	18.20
	5	31.70	13.50	18.20
	G	3	12.90	6.20

	4	31.70	13.50	18.20
	5	18.70	8.60	10.10
	6	18.70	8.60	10.10
H	4	18.70	8.60	10.10
	5	12.90	6.20	6.70
	6	18.70	8.60	10.10
I	5	18.70	8.60	10.10
	6	18.70	8.60	10.10
	7	18.70	8.60	10.10
J	6	18.70	8.60	10.10
	7	28.50	13.60	14.90
	8	18.70	8.60	10.10
K	7	18.70	8.60	10.10
	8	18.70	8.60	10.10
	9	18.70	8.60	10.10
L	7	28.50	13.60	14.90
	8	28.50	13.60	14.90
	9	12.90	6.20	6.70
	10	12.90	6.20	6.70
M	7	18.70	8.60	10.10
	8	18.70	8.60	10.10
	9	18.70	8.60	10.10
N	8	18.70	8.60	10.10

3. Metodología para la interpretación de resultados de las propiedades químicas en el contexto de fertilidad de suelos.

Cuadro 26. Niveles críticos generales y condiciones medias, altas y anormales para interpretar el análisis de fertilidad de suelos (valores en negrita pueden ser problemáticos de acuerdo a la variable) [38].

Grupos	Característica	Unidades	Categoría			
			Nivel Crítico	Media	Alta	Anormal
Parámetros de Acidez	pH en agua	--	< 5.5	5.6 - 6.5	> 6.5	--
	Acidez	cmol(+)/L	< 0.5	0.5 - 1.5	> 1.5	--
	Saturación acidez	%	< 10	10.0 - 50.0	> 50.0	--
CICE y bases	Suma bases	cmol(+)/L	< 5.0	5.0 - 25.0	> 25.0	--
	CICE	cmol(+)/L	< 5.0	5.0 - 25.0	> 25.0	--
	Ca	cmol(+)/L	< 4.0	4.0 - 20.0	> 20.0	> 50.0
	Mg	cmol(+)/L	< 1.0	1.0 - 5.0	> 5.0	> 15.0
	K	cmol(+)/L	< 0.2	0.2 - 0.6	> 0.6	> 5.0
Relaciones Catiónicas	Ca/Mg	--	< 2.0	2.0 - 5.0	> 5.0	--
	Ca/K	--	< 5.0	5.0 - 25.0	> 25.0	--
	Ca+Mg/K	--	< 10.0	10.0 - 40.0	> 40.0	--
	Mg/K	--	< 2.5	2.5 - 15.0	> 15.0	--
P y micronutrientes	P	mg/L	< 10.0	10.0 - 20.0	> 20.0	> 200.0
	Zn	mg/L	< 2.0	2.0 - 10.0	> 10.0	> 50.0
	Mn	mg/L	< 5.0	5.0 - 50.0	> 50.0	> 100.0
	Fe	mg/L	< 10.0	10.0 - 100.0	> 100.0	> 500.0
	Cu	mg/L	< 2.0	2.0 - 20.0	> 20.0	> 100.0

Cuadro 27. Interpretación general de los niveles crítico, medio y alto en el análisis de fertilidad de suelos [47].

Niveles	Interpretación
Crítico	Se evalúa y se espera la aplicación de un fertilizante que contenga dicho nutriente, de acuerdo al cultivo y condiciones en el campo (suelo, clima).
Medio	La respuesta es la aplicación de un fertilizante en cantidades menores. Sin embargo, se debe evaluar nuevamente las condiciones de campo y analizar si realmente presenta a futuro una diferencia significativa en la producción.
Alto	Significa que existe suficiente nutriente para solventar las necesidades del cultivo. Por lo tanto, la aplicación de un fertilizante en específico no tendría respuesta relevante en rendimiento

Nota: considerar siempre la CICE, importante para determinar la disponibilidad de nutrientes en el suelo para la absorción del cultivo.

4. Metodología para la determinación del Índice de Susceptibilidad a Deslizamiento y sus Factores Pasivos y Activos.

Cuadro 28. Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con características del lugar de estudio [65].

Clase	Calificativo de susceptibilidad a deslizamiento	Características
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la Influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.

II	Baja	<p>Sectores estables, que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.</p>
III	Moderada	<p>No se recomienda la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, reforestación, entre otros. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos agropecuarios.</p>
IV	Alta	<p>No se recomienda la construcción de infraestructura, para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.</p>
V	Muy alta	<p>No se recomienda la construcción de infraestructura, se recomienda como áreas de protección</p>

Para el parámetro de susceptibilidad litológica (P_l), se utilizó la capa litológica presente en el Atlas 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Una vez que se obtuvo la

descripción del área de estudio, se clasificó de acuerdo a las características físico-mecánicas típicas, (ver Cuadro 29).

Cuadro 29. Clasificación del parámetro de susceptibilidad litológica de acuerdo con las características físico-mecánicas típicas [66].

Valor del parámetro	Litología	Características físico-mecánicas típicas
1	Aluviones gruesos, permeables, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeables. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático.	Sanos con poco o ninguna meteorización, resistencia elevada al corte, fisuras sanas sin rellenos
	Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	
2	Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático a profundidades intermedias.	Resistencia media a elevada al corte, fracturas cizallables
3	Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas.	Resistencia al corte: moderada a media, fracturación importante

	Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos	
4	Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte: moderada a baja
5	Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradiente hidrodinámicos muy elevados.	Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos

De acuerdo con el parámetro de pendiente (P_p), se usó en un principio el Modelo de Elevación Digital (MED) del Atlas 2014 del ITCR, para generar el mapa de pendientes de FEIMA, (ver Cuadro 30).

Cuadro 30. Clasificación del parámetro pendiente, con respecto a las condiciones de terreno [66].

Grado	Pendiente	Condiciones del terreno	Valor
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión.	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5
>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6

El último factor pasivo fue el parámetro de humedad del terreno (P_h). Para su cálculo se realizó una clasificación de precipitaciones (ver Cuadro 31), para valores de precipitaciones medias mensuales de Turrialba, de la estación meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Turrialba, con un registro de 1972-2016.

Cuadro 31. Clasificación de las precipitaciones promedio mensual, de acuerdo con los valores asignados [67].

Precipitación media mensual (mm)	Valor
<125	0
125-250	1
>250	2

Con esa variable definida, se asignó el factor de humedad de acuerdo con el valor acumulado de índice de precipitación para cada mes del año (Cuadro 32). De esta forma se obtuvieron valores que oscilaron de 0-24 unidades, una vez realizada la sumatoria anual.

Cuadro 32. Factor humedad del suelo (P_h), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada [68].

Valor acumulado de índice de Precipitación	Clasificación	Factor P_h
0-4	Muy Bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy Alto	5

Para el parámetro de sismicidad (D_s) se utilizó el Atlas 2014 del ITCR, con el fin de extraer un shapefile de amenazas sísmicas de 100 años, en función de la aceleración sísmica (PGA), (Cuadro 33).

Cuadro 33. Parámetro de sismicidad (D_s), basado en el evento de 100 años en la escala MM respecto a la intensidad [68, 69].

Intensidad MM	PGA (m/s^2)	Grado de susceptibilidad	Valor D_s
III	0.098 - 1.226	Leve	1
IV	1.227 - 2.011	Muy Bajo	2
V	2.012 - 2.894	Bajo	3
VI	2.895 - 3.679	Moderado	4
VII	3.680 - 4.365	Medio	5
VIII	4.366 - 5.445	Elevado	6
IX	5.446 - 6.426	Fuerte	7
X	6.427 - 7.210	Bastante Fuerte	8
XI	7.211 - 8.388	Muy Fuerte	9
XII	>8.389	Extremadamente Fuerte	10

Para la lluvia máxima (D_U), se utilizó un registro de precipitaciones máximas mensuales de 1972-2016 de la estación meteorológica del CATIE en Turrialba. Con esto, se procedió a estimar el monto de precipitación para un periodo de retorno de 100 años, mediante valores extremos con el método Gumbel. En el (Cuadro 34) se muestra el parámetro de lluvia y su clasificación, respecto a la precipitación máxima en 24 h.

Cuadro 34. Parámetro de lluvia máxima (D_{11}), para un periodo de retorno de 100 años [67].

Lluvia máxima 24 h, T=100	Clasificación	Factor D_{11}
<100	Muy Bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
>400	Muy Alto	5

Finalmente, al completarse las cinco capas anteriormente descritas, se procedió a utilizar la ecuación 7, respetando la clasificación que se muestra en el (Cuadro 35).

Cuadro 35. Clasificación del índice de susceptibilidad y su potencial de deslizamiento [33].

Índice de susceptibilidad a deslizamientos	Clasificación	Potencial de deslizamiento
0-6	I	Muy Bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Mediano
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy Alto

5. Características de humedad del suelo en función de la clase textural.

Cuadro 36. Valores porcentuales de CC, PMP y CRAD, de acuerdo a la clase textural del suelo [46].

Textura	CC (%)	PMP (%)	CRAD (%)
Arenoso	9(5-16)	9(5-16)	9(5-16)
Franco Arenoso	14(10-20)	14(10-20)	14(10-20)
Franco	22(15-30)	22(15-30)	22(15-30)
Franco arcilloso	27(25-35)	27(25-35)	27(25-35)
Arcillo limoso	31(27-40)	31(27-40)	31(27-40)
Arcilloso	35(30-70)	35(30-70)	35(30-70)