**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL**
**DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**
**MODALIDAD VIRTUAL**

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

# ESTUDIO EXPLORATORIO DE TÉCNICA DE BAJO COSTO PARA REGENERACIÓN DE LOS HORIZONTES A Y O, EN LOS SUELOS DE INTERÉS EN ZONAS POTENCIALES DE CONSERVACIÓN Y RECARGA HÍDRICA DE LA MICRO-CUENCA DE LAS QUEBRADAS CARACOL Y TRAPICHE, SAN RAMÓN DE ALAJUELA, COSTA RICA.

**OSVALDO FRANCISCO FERNÁNDEZ CASCANTE**

**TURRIALBA, COSTA RICA**

**2020**

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor del estudiante, como requisito para optar por el grado de

**Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**FIRMANTES:**

Laura Benegas, Ph.D.
**Co asesora del Trabajo de Graduación**

Bommat Ramakrishna, Ph.D.
**Co asesor del Trabajo de Graduación**

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
**Decana de la Escuela de Posgrado**

Osvaldo F. C.

Osvaldo Francisco Fernández Cascante
**Candidato**

**Índice**

Agradecimientos ..... xi
1 Introducción ..... 1
1.1 Antecedentes ..... 1
1.2 Justificación ..... 2
1.3 Importancia ..... 2
1.4 Supuestos ..... 3
1.5 Objetivos ..... 4
2 Revisión Literaria ..... 5
2.1 Conceptos Hidrológicos ..... 5
2.1.1 Ciclo Hidrológico ..... 5
2.1.2 Recarga de los acuíferos ..... 5
2.2 Conceptos Edafológicos ..... 6
2.2.1 Etapas de la formación del suelo ..... 6
2.2.2 El perfil y los horizontes del suelo ..... 8
2.2.3 Nomenclatura ABC de los horizontes del suelo ..... 9
2.3 Lucha contra la desertificación en el Sahel Africano ..... 9
2.3.1 Caso de Yacouba Sawadogo ..... 9
2.4 Micro-organismos eficientes del suelo y biofermentos ..... 10
2.5 Conceptos para Condensación Pasiva sobre y bajo el retenedor de humedad ..... 12
2.5.1 Aire Seco y Húmedo ..... 12
2.5.2 Presión ..... 12
2.5.3 Humedad ..... 15
2.5.4 Condensación en Aire Atmosférico ..... 16
2.5.5 Poder Evaporante del Aire y Evaporación ..... 19
3 Metodología ..... 20
3.1 Área de Estudio ..... 20
3.2 Especies de árboles seleccionadas ..... 24
3.2.1 Cedro amargo (Cedrela odorata L.) ..... 24
3.2.2 Cenízaro (Samanea saman) ..... 24
3.2.3 Sotacaballo (Zygia longifolia) ..... 24

3.2.4 Níspero Zapotillo (Manilkara zapota) ..... 25
3.2.5 Almendro de montaña (Dipterix panamensis) ..... 25
3.3 Visita exploratoria ..... 26
3.4 Población ..... 26
3.5 Procedimientos metodológicos ..... 29
3.5.1 Preparación de biofermento local ..... 29
3.5.2 Regenerador de Horizontes A y O ..... 29
3.5.3 Pruebas de Movimiento del Agua en el Suelo ..... 30
3.5.4 Prueba de Supervivencia del Arbolito ..... 31
3.5.5 Prueba de Determinación de Humedad en Suelos ..... 32
3.6 Resultados Esperados ..... 38
4 Pruebas ..... 39
4.1 Limitantes Técnicas de Estudio ..... 39
4.2 Pruebas Microcuenca Caracol ..... 40
4.2.1 Punto 1: cilindro 5 ..... 41
4.2.2 Punto 2: cilindro 3 ..... 44
4.2.3 Punto 3: cilindro 7 ..... 47
4.2.4 Punto 4: cilindro 1 ..... 50
4.2.5 Supervivencia semanal ..... 52
4.3 Pruebas Microcuenca Trapiche ..... 56
4.3.1 Punto 1: cilindro 1 ..... 61
4.3.2 Punto 2: cilindro 2 ..... 62
4.3.3 Punto 3: cilindro 3 ..... 63
4.3.4 Punto 4: cilindro 4 ..... 64
4.3.5 Punto 5: cilindro 5 ..... 65
4.3.6 Supervivencia semanal ..... 66
4.4 Resumen Comparativo ..... 72
5 Discusión de Resultados ..... 74
6 Conclusiones ..... 78
7 Recomendaciones ..... 80
8 Bibliografía ..... 81
9 Anexos ..... 85

9.1 Cronograma Inicial ..... 85
9.2 Cronograma Final ..... 86
9.3 Reporte de Resultados de Ensayo: Preparado de Microorganismos Eficientes ... 87
9.4 Tabla de Costos de Materiales ..... 88

**Índice de Figuras**

Figura 1: El Ciclo Hidrológico ..... 5
Figura 2: Relación entre el clima y los suelos a lo largo de un gradiente latitudinal (a partir de ..... 8
Figura 3: Técnica modificada de hoyos zaï de Yacouba Sawadogo, sobre terreno afectado por desertificación ..... 10
Figura 4: Mapa de delimitación de las microcuencas en la región de estudio ..... 20
Figura 5: Mapa de ubicación de las microcuencas en Costa Rica ..... 21
Figura 6: Croquis de ubicación del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central ... 22
Figura 7: Mapa de las formaciones geológicas del área en estudio ..... 23
Figura 8: Mapa de las coberturas del área en estudio (1998) ..... 28
Figura 9: Técnica modificada de hoyos Zaï, realizada por Yacouba Sawadogo ..... 29
Figura 10: Diagrama simplificado del diseño del regenerador de horizontes A y O, corte trasversal ..... 30
Figura 11: Método modificado para medir la conductividad hidráulica propuesto por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano ..... 31
**Figura 12:** Propiedades de interés de una columna de aire atmosférico para la determinación de la ecuación predictiva de presión atmosférica según la altitud (Fuente: Fernández, 2014). ..... 32
Figura 13: Volumen de control para una columna de aire atmosférico al aumentar la altitud ..... 33
Figura 14: Mapa de los puntos de prueba en la Microcuenca Caracol-Trapiche ..... 40
Figura 15: Muestra obtenida con el Barreno, punto 1 ..... 41
Figura 16: Prueba de supervivencia inicial, punto 1, se plantaron árboles de cedro amargo (*Cedrela odorata*) ..... 43
Figura 17: Muestra obtenida con el Barreno, punto 2 ..... 44
Figura 18: Prueba de supervivencia inicial, punto 2, se plantó un árbol de cenízaro (*Samanea saman*) ..... 46
Figura 19: Muestra obtenida con el Barreno, punto 3 ..... 47
Figura 20: Prueba de supervivencia inicial, punto 3, se plantó un árbol de cenízaro (*Samanea saman*) ..... 49
Figura 21: Prueba de supervivencia inicial, punto 4, en las donas del regenerador puntual de horizontes A y 0, se plantaron árboles de zota caballo (*Zygia latifolia*). ..... 51
Figura 22: Prueba de Supervivencia final, punto 1 ..... 52
Figura 23: Prueba de Supervivencia final, punto 2 ..... 53
Figura 24: Prueba de Supervivencia final, punto 3 ..... 54
Figura 25: Prueba de Supervivencia final, punto 4 ..... 55
Figura 26: Mapa general de los puntos de prueba en la Microcuenca Caracol-Trapiche .... 56
Figura 27: Mapa en detalle de los puntos de prueba en la Microcuenca Trapiche, los puntos cuya etiqueta ubican 2 árboles de almendro de montaña que se plantaron para usarse como control sin aplicar la técnica del regenerador puntual de horizontes A y 0 ..... 57
Figura 28: Muestra obtenida con el Barreno, ejemplo en el punto 1 ..... 58

Figura 29: Mezcla del abono orgánico con el material del suelo local, ejemplo en el punto 1, para el relleno de la dona del regenerador puntual de horizontes A y 0. ..... 58
Figura 30: Rellenado de las donas del regenerador puntual de horizontes A y 0, ejemplo en el punto 1. ..... 59
Figura 31: Envoltura de la dona rellena del regenerador puntual de horizontes A y 0 con la película plástica captadora/retenedora de humedad, ejemplo del punto 4. ..... 59
Figura 32: Regenerador puntual de horizontes A y 0 cubierto con hojarasca y marcado para evitar que tanto personas como animales lo destruyeras, ejemplo del punto 5. ..... 60
Figura 33: Prueba de presencia de humedad en el retenedor/colector de humedad de los regeneradores puntuales de horizontes A y 0 ..... 66
Figura 34: Prueba de Supervivencia final, punto 1 ..... 67
Figura 35: Prueba de Supervivencia final, punto 2 ..... 68
Figura 36: Prueba de Supervivencia final, punto 3 ..... 69
Figura 37: Prueba de Supervivencia final, punto 4 ..... 70
Figura 38: Prueba de Supervivencia final, punto 1 ..... 71

**Índice de Tablas**

Tabla 1: Constantes para los gases ..... 15
Tabla 2: Características de la zona de vida del área de estudio ..... 23
Tabla 3: Características para valoración de la especie: Cedro amargo (Cedrela odorata L.) ..... 24
Tabla 4: Características para valoración de la especie: Cenízaro (Samanea saman) ..... 24
Tabla 5: Características para valoración de la especie: Sotacaballo (Zygia longifolia) ..... 24
Tabla 6: Características para valoración de la especie: Níspero Zapotillo (Manilkara zapota) ..... 25
Tabla 7: Características para valoración de la especie: Almendro de montaña (Dipterix panamensis) ..... 25
Tabla 8: Cantidad de hogares según procedencia de agua potable, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011 ..... 26
Tabla 9: Cantidad de hogares según tipo de sumidero de aguas negras, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011 ..... 27
Tabla 10: Ocupación por Hogar, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011 ..... 27
Tabla 11: Ficha Técnica de Campo, Punto 1, Pendiente 35%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 41
Tabla 12: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 1, masa saturada = 0,4265 kg ..... 42
Tabla 13: Ficha Técnica de Campo, Punto 2, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 44
Tabla 14: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 2, masa saturada = 0,4690 kg ..... 45
Tabla 15: Ficha Técnica de Campo, Punto 3, Pendiente 20%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 48
Tabla 16: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 3, masa saturada = 0,4320 kg ..... 48
Tabla 17: Ficha Técnica de Campo, Punto 4, Pendiente 20%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 50
Tabla 18: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 4, masa saturada = 0,4490 kg ..... 50
Tabla 19: Ficha Técnica de Campo, Punto 1, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 61
Tabla 20: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 1, masa saturada = 0,480 kg ..... 61
Tabla 21: Ficha Técnica de Campo, Punto 2, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 62
Tabla 22: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 2, masa saturada = 0,4765 kg ..... 62
Tabla 23: Ficha Técnica de Campo, Punto 3, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0 ..... 63

Tabla 24: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 3, masa saturada = 0,4230 kg ..... 63
Tabla 25: Ficha Técnica de Campo, Punto 4, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0..... 64
Tabla 26: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 4, masa saturada = 0,4105 kg ..... 64
Tabla 27: Ficha Técnica de Campo, Punto 5, Pendiente 0%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0..... 65
Tabla 28: Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 5, masa saturada = 0,5190 kg ..... 65
Tabla 29: Tabla resumen de pruebas de Conductividad Hidráulica, 4 locaciones de la microcuenca de la quebrada Caracol, el 9 de setiembre de 2019 ..... 72
Tabla 30: Tabla resumen de pruebas de Conductividad Hidráulica, 5 locaciones de la microcuenca de la quebrada Trapiche, el 22 de noviembre de 2019..... 72

**Lista de Acrónimos, Abreviaturas y Unidades**

| | |
|---|---|
| ASADA | Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales en Costa Rica |
| CATIE | Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza |
| SINAC | Sistema Nacional de Áreas de Conservación |

## Agradecimientos

Primero que todo, agradezco a Tatica Dios por toda esta oportunidad de vida que me ha dado, luego de que me ayudara a superar mi proceso oncológico.

A mi familia:

- A mi papá Rodolfo, mi mamá Adita y mis hermanas: Lucrecia, Cristina y Jazmín, por su apoyo y amor incondicional.
- A mi abuela Cecilia y mi abuelo Sergio, gracias por apoyar y creer en este "*sacatestos*".
- A mis abuelitos Porfirio y Margarita, que desde el Cielo me acompañaron.
- Con una especial dedicatoria a mi tito Vicente, quien me vio comenzar en la tierra y desde el Cielo pudo ver cómo finalicé este trabajo y quien en la tierra me brindó todo su amor y cariño, junto con mi tita Raquel, para superar todos los procesos de radioterapia y quimioterapia.
- A mis tías Sandra y Marlene por su apoyo y los cuidados brindados a mi tito Vicente y mi tita Raquel.

Al doctor Alejandro Blanco, por su apoyo y lucha durante mi tratamiento de radioterapia y quimioterapia, a las enfermeras doña Grettel y a doña Olguita, y al enfermero Ronald, del Hospital México, Costa Rica.

Al señor don Víctor Cortés Granados, profesor de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica por su apoyo, ánimo y guía.

Al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica y su encargado, el señor don Francisco Solano, por su guía y apoyo para realizar las pruebas necesarias para comprobar la validez del presente método.

A la ASADA de Calle Zamora y a la ASADA de San Rafael, por creer en que sí es posible cambiar el panorama futuro con respecto a la disponibilidad de agua en las microcuencas en estudio.

A mis estimables amigos Uvencio y Domingo, por la ayuda que me brindaron para la instalación de los regeneradores puntuales de horizontes A y 0 en los diferentes puntos de las microcuencas, sin la cual este proyecto hubiera sido imposible.

A doña Laura y don Bommat, del CATIE, mis asesores, gracias por confiar en mí, por su guía y creer en la realización del presente proyecto.

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes

Los suelos, desde el punto de vista productivo, son un recurso indisociable de la gestión integral de las cuencas, pues su estado e integridad determinan la calidad y cantidad del almacenamiento y disponibilidad del recurso agua para todo tipo de actividades desarrolladas en la misma.

Para el caso de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche (en el distrito San Rafael, del cantón San Ramón, de la provincia de Alajuela en Costa Rica), las actividades que más requieren de la disponibilidad del recurso hídrico están la agropecuaria y la de consumo humano.

Para esta última actividad, se debe considerar que el distrito administrativo de San Rafael contará con una población de 10546 habitantes en 2019, según proyecciones de población del Centro Centroamericano de Población. Repartidos en varios poblados: Calle Zamora, Rincón de Orozco, Berlín, Pata de Gallo, Llano Brenes, Rincón de Mora, Alto Salas, San Rafael y la Unión, de los cuales, la microcuenca Caracol-Trapiche abastece y desagua a las poblaciones de Calle Zamora y Rincón de Orozco.

Los principales factores que aumentarán la vulnerabilidad de las comunidades ante eventos climáticos extremos de sequía son la disminución de las precipitaciones, la captación y disponibilidad del agua por infiltración en los mantos acuíferos locales.

La ASADA[1] ha realizado esfuerzos poco efectivos para la recuperación de la estructura física de los suelos alrededor de las tomas de sus pozos dentro de la microcuenca, como el cercado con alambre para evitar el ingreso de ganado y la plantación de árboles nativos de sotacaballo (*Zygia longifolia*) que no sobreviven a la estación seca anual.

Los miembros de la ASADA presumen que dicha muerte de árboles es debido a la falta de humedad durante la estación seca. Por parte de esta investigación, se presume que está relacionada directamente con la degradación de los suelos locales, por procesos sostenidos de compactación de pie de vaca y por la pérdida progresiva de los horizontes A y O.

Dado que la humedad retenida por los suelos y su fertilidad están ligados con el contenido de materia orgánica en ellos (Birkel, 2018 y Walter, 2018), surge la necesidad de incorporar una técnica de bajo costo y baja complejidad para la recuperación y regeneración de estos horizontes en los suelos.

[1] '*Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales en Costa Rica. Las ASADAS en Costa Rica administran los sistemas de acueducto y alcantarillado comunales, bajo un esquema de delegación de la administración, acordado con el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, mediante un Convenio de Delegación de Administración.*' (SINIGIRH, 2019)

En la naturaleza, los procesos de formación y regeneración de los suelos son lentos, sin embargo, se explora la forma en que Yacouba Sawadogo, desde 1974, ha logrado detener el avance de la desertificación en su natal Burkina Faso (Kaboré y Reij, 2004), para adaptarlo a la microcuenca Caracol-Trapiche, en beneficio de los ecosistemas y poblaciones humanas locales.

Por lo tanto, en el presente trabajo se abordará el diseño y prueba de un dispositivo de regeneración de los horizontes A y O de los suelos de interés en la microcuenca de interés.

## 1.2 Justificación

Dentro de la gestión integral del recurso hídrico en cuencas hidrográficas es fundamental contar con una serie de técnicas para conciliar intereses dispares entre los actores locales y externos. Esto con el fin de lograr acuerdos y compromisos para el éxito de la gestión sostenible de un recurso común y de indudable valor para todo ser vivo: el agua.

Sin embargo, en todo proceso de conciliación, los desacuerdos respecto a la gestión de este limitado recurso se pueden recrudecer al carecer de técnicas accesibles en costo económico y técnico que faculten a las poblaciones a gestionar por ellas mismas el proceso.

Dentro de esta temática, surge el problema de la cantidad del recurso disponible en cuencas donde las actividades humanas han generado una alteración importante en el ciclo hidrológico: degradando suelos en todo tipo de terreno y en una parte especialmente sensible, las zonas altas.

Dicha degradación comienza con el cambio de uso de la tierra de uno forestal a uno pecuario, donde el bosque original es removido para producir pastos para el alimento de ganado. Luego, el proceso continuó con el continuo pisoteo de los animales y la impermeabilización del suelo, dando origen a un aumento en la escorrentía superficial, en detrimento de la infiltración en el subsuelo y la degradación de las capas superficiales del suelo: las más ricas en materia orgánica y nutrientes disponibles para las plantas.

Por lo que se considera de vital importancia, dentro de todo hipotético proceso de gestión integral de una cuenca, en mantener procesos de monitoreo y recuperación de las zonas altas degradadas.

Para tal fin, en el presente trabajo, se propondrá diseñar un método barato para acompañar la regeneración de la zona de alta en la cuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, mediante la recuperación de la estructura física, química y biológica de los horizontes O y A de los suelos locales en puntos focales para regeneración. De forma que la intervención requerida sea mínima a lo largo del año.

## 1.3 Importancia

Como se estudió en los cursos correspondientes, durante el transcurso de la presente maestría, el estado de los suelos en una cuenca es un factor que determina la calidad de los procesos de infiltración y disponibilidad de agua en los acuíferos para desarrollar las actividades humanas y ecosistémicas.

No obstante, las técnicas para la conservación pueden ser caras y para su regeneración pueden ser lentas.

Por lo cual, mediante la investigación y mejora adaptativa de una experiencia exitosa relacionada con la práctica de manejo para la regeneración de suelos en África, llevada a cabo desde 1974 por Yacouba Sawadogo, y debido a la importancia de los sustratos A y O en el proceso de pedogénesis, se plantea el diseño y prueba de un regenerador puntual de dichos horizontes, en conjunto con el análisis termodinámico del colector de precipitación asociado a éste, para proyectos de reforestación en la zona alta hídrica en las microcuencas de las quebradas Caracol y Trapiche, Costa Rica, que permitan la supervivencia de los árboles utilizados en reforestación por la ASADA de Calle Zamora y Rincón de Orozco, en su proceso de manejo de los recursos agua y suelo.

Lo anterior con el fin de dotar de una práctica de manejo a los actores institucionales de la ASADA, que sea simple, de bajo costo y efectivo. El cual les permita gestionar integralmente los recursos agua y suelo de la misma y reducir su vulnerabilidad a los efectos de la sequía estacional, agravados por el calentamiento global.

## 1.4 Supuestos

Para la presente investigación, se parte de los siguientes supuestos:

1. Con la recuperación puntual de los horizontes A y O, se favorece la incorporación y retención de materia orgánica a la unidad pedológica. Lo que subsecuentemente mejorará la estructura física, química y biológica de los suelos, la retención de humedad, la infiltración de lluvia y la supervivencia de los árboles en la zona alta de la microcuenca Caracol-Trapiche.
2. La incorporación de microrganismos eficientes locales (obtenidos por medio de la metodología descrita por Herrera (2019)) al regenerador puntual de horizontes A y O mejorará la estructura física de los suelos degradados por compactación y erosión.
3. Inicialmente, el área de pruebas y estudio abarcaría 3 puntos distribuidos en 2 hectáreas de la zona alta de la microcuenca. No obstante, finalmente abarcó 18 puntos de prueba en 9 localizaciones en 4 hectáreas de las microcuencas.
4. Las prácticas que se llevaron a cabo consistieron en cavar un hoyo zaï de 50cm de diámetro y 40 cm de profundidad, enterrar una dona de tela porosa rellena de abono bocashi, en combinación 50:50 con el suelo extraído, para retener la materia orgánica y plantar un árbol nativo en el centro de la dona. En conjunto con los actores propietarios de las fincas y representantes de la ASADA de Calle Zamora y San Rafael.

## 1.5 Objetivos

### General

Diseñar y probar una técnica para regeneración puntual de los horizontes A y O de los suelos, para las zonas altas de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, en San Ramón, Costa Rica, con el fin de contribuir con mejorar la disponibilidad de agua en los acuíferos locales, para la posterior gestión integral de la misma.

### Específicos

- Analizar la pertinencia de los principios de manejo del suelo llevados a cabo en la zona alta de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, para determinar sus efecto sobre este recurso y la recarga hídrica.
- Describir el método empírico utilizado por Yacouba Sawadogo para luchar contra la desertificación en Burkina Faso, con el fin de contar con una base técnica comprobable de los principios de manejo y sus efectos en el suelo, de donde partir para el diseño.
- Determinar las etapas del ciclo hidrológico en que se espera intervenir con la técnica a diseñar, con el fin de delimitar el campo de acción de la misma y definir las variables de control a tomar en cuenta.
- Determinar las condiciones locales del suelo, clima y zona de vida original de la microcuenca para recolectar y reproducir los microrganismos eficientes locales y utilizarlos en el regenerador puntual de horizontes A y O, como aceleradores del proceso de pedogénesis.
- Definir las especies vegetales a utilizar en las pruebas del regenerador puntual de horizontes y sus requerimientos biológicos de humedad, dependientes del tipo de zona de vida original.
- Realizar los cálculos termodinámicos necesarios para determinar una metodología para evaluar la eficacia de la membrana colectora de precipitación del regenerador.

# 2 Revisión Literaria

## 2.1 Conceptos Hidrológicos

### 2.1.1 Ciclo Hidrológico

Según Birkel (2018), el ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrósfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención mínima de reacciones químicas, y el agua solamente se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico.

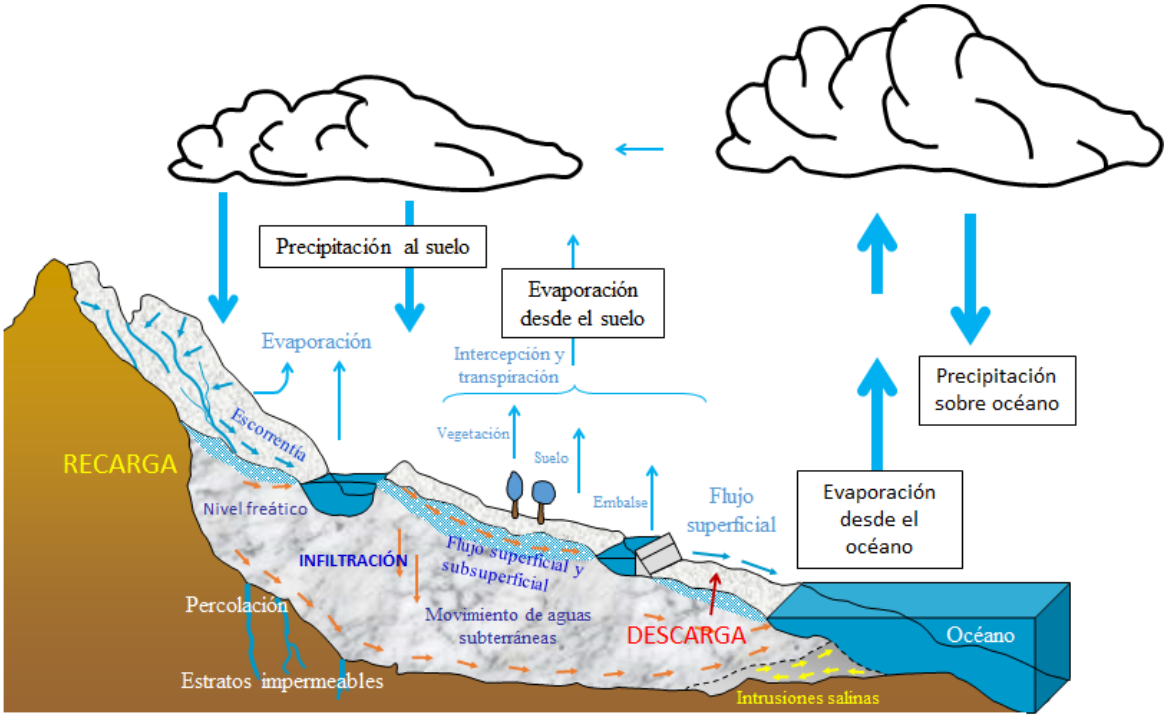


**Figura 1:** El Ciclo Hidrológico
(Fuente: Birkel, 2018)

### 2.1.2 Recarga de los acuíferos

De acuerdo con Birkel (2018), el agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente en comparación con la de los depósitos superficiales. El tiempo de la renovación hidráulica (el periodo necesario para renovar por completo un depósito a su tasa de renovación normal) es amplio. En algunos casos la renovación se ve interrumpida por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores (acuitardos), por compactación del suelo o por circunstancias climáticas asociadas a la aridez.

Asimismo, Birkel (2018) agrega que el agua de las precipitaciones puede tener distintos destinos una vez que alcanza el suelo.

Ésta se reparte en tres fracciones:

1. Escorrentía: es la parte que se desliza por la superficie del terreno, primero como arroyo difuso y luego como agua encauzada, formando arroyos y ríos.
2. Evapotranspiración: el agua se evapora desde las capas superficiales del suelo o pasa a la atmósfera con la transpiración de los organismos, especialmente las plantas.
3. Infiltración: la parte que se infiltra en el suelo y percola a diferentes profundidades y pasa a ser agua subterránea. Siendo éste el proceso de recarga de los acuíferos y que siguen una tasa de renovación.

El mismo autor añade que la proporción de infiltración respecto al total de las precipitaciones depende de varios factores:

- La litología: la naturaleza del material geológico que aflora a la superficie influye a través de su permeabilidad, la cual depende de la porosidad, del diaclasamiento y de la mineralogía del sustrato.
- Otro factor desfavorable para la infiltración es una pendiente marcada, así como la compactación también lo limita.
- La presencia de vegetación densa influye de forma compleja, porque reduce el agua que llega al suelo (interceptación), pero extiende en el tiempo el efecto de las precipitaciones, desprendiendo poco a poco el agua que moja el follaje, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración . Otro efecto favorable de la vegetación tiene que ver con las raíces, especialmente las raíces densas y superficiales de muchas plantas herbáceas, y con la formación de suelo, generalmente más permeable que la mayoría de las rocas frescas.

## 2.2 Conceptos Edafológicos

### 2.2.1 Etapas de la formación del suelo

'*El suelo procede de la roca madre, la cual se altera por la acción de los factores ambientales y en su formación se desarrollan una serie de procesos que transforman el material original hasta darle una morfología y propiedades propias.*' (Jaen, 2006, pp. 8)

Debido a la heterogeneidad de los procesos que tienen que ver con la formación del suelo, Jaen (2006) argumenta que el suelo es resultado de la acción de 5 factores formadores principales:

1. Litología: la naturaleza litológica del sustrato original condiciona las propiedades químicas (acidez, riqueza en nutrientes, etc.) y físicas del suelo (permeabilidad, consistencia, textura, color, etc.). Asimismo, la roca regula la penetración y

circulación del aire y del agua, lo que va a condicionar de un modo decisivo la fragmentación, alteración y translocación de los materiales.

2. Clima: el clima influye directamente sobre el suelo mediante la humedad y la temperatura, y de manera indirecta mediante la vegetación y el relieve. El clima es el principal agente de alteración química del suelo, así como de la fragmentación mecánica de determinados tipos de sustratos. El clima controla los procesos que tienen lugar en el suelo y su intensidad. La disponibilidad y el flujo de agua regulan la velocidad de desarrollo de la mayoría de los procesos edáficos. Muchas propiedades de los suelos presentan determinadas tendencias relacionadas con las características del clima.
3. Relieve: el relieve condiciona el desarrollo del suelo, fundamentalmente desde el punto de vista de la profundidad y la diferenciación de horizontes. El relieve influye sobre el transporte por gravedad, además, condiciona aspectos como la insolación, el drenaje del suelo y determinados procesos geomorfológicos.
4. Seres vivos: Los seres vivos afectan al suelo de diversas maneras: las plantas constituyen la principal fuente de materia orgánica del suelo. Los seres vivos condicionan tanto procesos de tipo químico como físico, favoreciendo en general la fertilidad del suelo. Los animales excavadores trituran y mezclan el material del suelo, lo que influye sobre la estructuración, la permeabilidad y la aireación. En general, los vertebrados y algunos invertebrados, como los artrópodos, son responsables de la bioturbación del suelo. Los invertebrados no artrópodos colaboran en la alteración de la materia orgánica y favoreciendo la mezcla de materia orgánica y mineral del suelo. La vegetación posee un papel clave en la formación del suelo, sobre todo si se considera su capacidad de meteorización de la roca (líquenes, raíces, etc.) o el aporte de materia orgánica.
5. Edad: el tiempo constituye un factor importante en la formación del suelo, de tal modo que los suelos más antiguos son los que muestran un mayor desarrollo en profundidad del perfil y una mayor diversificación de horizontes. La velocidad de formación del suelo va desde 1 mm/año hasta 0,001 mm/año. Las propiedades del suelo pueden variar en función del momento del día o el año, además de la existencia de cambios muy lentos que necesitan decenas o cientos de años para producirse

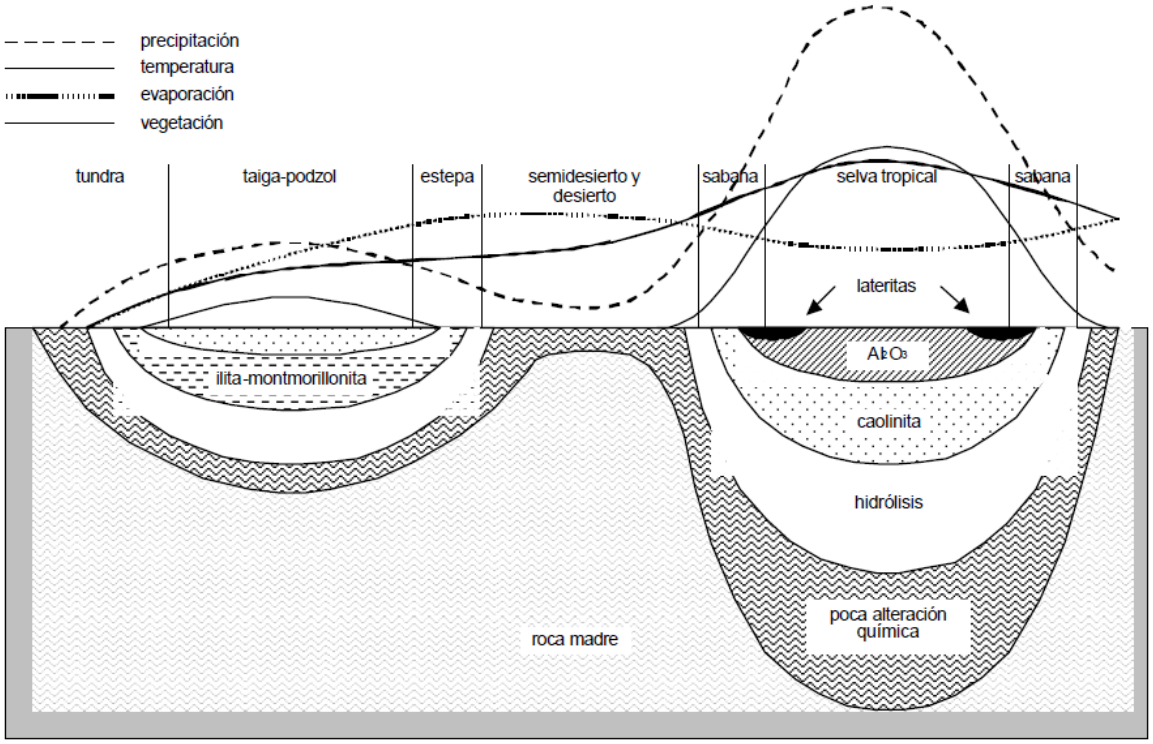


**Figura 2:** Relación entre el clima y los suelos a lo largo de un gradiente latitudinal (a partir de Strakhov, 1968) (Jaen, 2006, pp.9).

Según lo expuesto por Jaen (2006), la formación del suelo tiene lugar como consecuencia de la actuación de estos cinco factores formadores, y en ella desde el punto de vista didáctico se pueden distinguir dos etapas: la etapa inicial que representa la diferenciación de los constituyentes del suelo y una etapa final en la que los constituyentes se reorganizan y evolucionan para formar el suelo.

### 2.2.2 El perfil y los horizontes del suelo

Según Jaen (2006), como la edafización actúa desde la superficie y va perdiendo su intensidad conforme se profundiza en el perfil del suelo, el material se altera de un modo diferencial y como resultado de la actuación de estos procesos de meteorización y translocación se pasa de un material homogéneo o uniforme, como es la roca, a un material heterogéneo, estratificado en capas con diferentes propiedades como es el suelo; es decir, se produce la horizonación del material. Y es precisamente esta característica, representada por la variación regular de las propiedades y constituyentes del suelo en función de la profundidad, la característica más representativa de los suelos, rasgo que los diferencia claramente de las rocas.

A cada capa en que se organiza el material del suelo se le denomina horizonte, y su superposición constituye el perfil del suelo.

### 2.2.3 Nomenclatura ABC de los horizontes del suelo

Jaen (2006) expone que los horizontes se designan mediante letras mayúsculas que nos indican las características fundamentales del material de que está constituido. De manera simple, los horizontes de interés para la presente investigación se designan mediante las siguientes letras:

- O: capa de hojarasca sobre la superficie del suelo (sin saturar agua; >35%), frecuente en los bosques.
- A: formados en la superficie, con mayor porcentaje de materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, más o menos negro, pero cuando contiene poca materia orgánica (suelos cultivados) puede ser claro. Estructura migajosa y granular. Por otro lado, estas capas '*es donde ocurre la incorporación de materia orgánica y donde la actividad biológica tiene su máxima expresión; también puede haber algún lavado.*' (Zinck, 2012, pp. 46), y de importante para la presente investigación, según (Schaetzl, 2005, pp. 37), estos horizontes minerales formados bajo el horizonte O están caracterizados por una acumulación de materia orgánica transformada en humus íntimamente mezclada con la fracción mineral, con propiedades resultantes de las perturbaciones debido a cultivos, pasturas o similares.

## 2.3 Lucha contra la desertificación en el Sahel Africano

### 2.3.1 Caso de Yacouba Sawadogo

Yacouba Sawagodo, según lo expuesto por Hertsgaard (2009), es un granjero de Burkina Faso quien ha trabajado con éxito en la restauración de suelos degradados por el proceso de desertificación y sequía por medio de una técnica tradicional llamada Zaï. Dicha técnica es reconocida dentro de regeneración natural de los suelos.

Según el autor, el uso de su técnica de hoyos Zaï modificada, ayudó a subir el nivel del agua sub-superficial a lo largo de las zonas hasta 5 metros.

***Características de técnica Zaï y la mejora empírica implementada por Yacouba Sawadogo***

Esta técnica, acorde con lo expuesto por Kaboré y Reij (2004), consiste en hoyos excavados en el suelo que tradicionalmente se usaban, de una manera muy limitada, para restaurrs las tierras yermas. Yacouba Sawadogo inició con la innovación de llenar los hoyos Zaï con estiércol y otras materiales biodegradables de los desechos de sus cultivos de temporada, con el fin de proveer de una fuente de nutrientes a las plantas, no obstante, el estiércol terminaría atrayendo termitas cuyos intricados sistemas de túneles rompieron el suelo compactado y favorecieron la aireación, infiltración y retención de humedad y nutrientes.

Lo que reforzó la acción del factor formador “Seres Vivos”, que cita Jaen (2006), al mantener su capacidad de meteorización de la roca madre y el aporte de materia orgánica constantes, a lo largo del año.

**Figura 3:** Técnica modificada de hoyos zaï de Yacouba Sawadogo, sobre terreno afectado por desertificación (Fuente: https://haimaneltroudi.com/wp-content/uploads/2019/01/haiman-el-troudi-yacouba-sawadogo-el-hombre-volvi%C3%B3-f%C3%A9rtil-el-desierto-5-1024x683.jpg)

## 2.4 Micro-organismos eficientes del suelo y biofermentos

En su artículo, Montoya (2012) se refiere a los microorganismos eficientes, como el inoculante microbiano que restablece el equilibrio microbiológico del suelo, mejorando sus condiciones físico-químicas, incrementando la producción de los cultivos y su protección; además conserva los recursos naturales, generando una agricultura sostenible.

Estos micro-organismos eficientes del suelo tienen efectos en las condiciones físicas del suelo: mejoran la estructura y agregación de las partículas del suelo, reducen su compactación, incrementan los espacios porosos y mejora la infiltración del agua.

De esta manera se disminuye la frecuencia de riego, evitan la erosión por el arrastre de las partículas.

Por cuanto a los efectos en la microbiología del suelo son:

- Ellos suprimen o controlan las poblaciones de microorganismos patógenos que se desarrollan en el suelo por competencia.
- Incrementan la biodiversidad microbiana.
- Generan las condiciones necesarias para que los microorganismos benéficos nativos prosperen.

Lo que en conjunto favorece con la regeneración natural del suelo al promover la meteorización de los materiales parentales y de la roca madre por parte de la microbiota, asimismo, la aplicación favorece la disponibilidad de nutrientes para la plantas, según Herrera (2012), en forma de quelatos, lo cual actúa en favor del desarrollo de los sistemas radiculares de las plantas y, por consecuencia, a los procesos de oxidación y reducción producto de la aireación e hidratación.

Según Herrera (2012), para extraer los microorganismos eficientes del medioambiente local y utilizarlos para su aplicación, se utiliza la técnica de los *biofermentos*. Con esta se obtiene del bosque o medio ambiente local material biológico de calidad y obtener 5 grupos de microorganismos para su reproducción para el agro:

- Bacterias aeróbicas.
- Bacterias anaeróbicas.
- Actinomicetos.
- Hongos benéficos.
- Levaduras.

Este material extraído consiste en hojarasca en contacto con el suelo, al pie de árboles frondosos y antiguos del bosque local. Mezclarlos con agua estéril (hervida y sin clorar) que contenga algún material nutritivo (melaza, dulce de caña, suero de leche, etc.), dejar fermentar por 30 días, para luego aplicar al suelo.

Cabe añadir que, según el análisis de laborarorio del Anexo 9.3, el preparado de microorganismos eficientes del bosque preparado no llegó a contener hongos benéficos, levaduras y actinomicetos, quizá debido al tiempo de fermento o a la calidad del material biológico extraído.

Por lo tanto, para capa punto de prueba del regenerador puntual de horizontes A y 0 se hace necesario del uso de una enmienda orgánica.

Ésta consiste en la aplicación directa de hojas del suelo del bosque original a los distintos regeneradores en los puntos de prueba.

## 2.5 Conceptos para Condensación Pasiva sobre y bajo el retenedor de humedad

### 2.5.1 Aire Seco y Húmedo

El aire atmosférico es una mezcla de varios gases en distintas proporciones, estas proporciones son dinámicas a través del tiempo geológico (Birkel, 2013), entre los gases que la componen están: Nitrógeno ($N_2$) 78%, Oxígeno ($O_2$) 20%, Argón (Ar) 1% y el último 1% corresponde a una serie de gases que incluye hidrógeno, gases nobles, compuestos de carbono y vapor de agua.

Para este proyecto, se define *aire seco* como el aire atmosférico que no posea vapor de agua entre sus componentes, por otro lado, el concepto de *aire húmedo* se define como el aire atmosférico que contenga vapor de agua en su composición.

### 2.5.2 Presión

La *presión atmosférica* ($P_{atm}$) se define como el peso de una columna de aire, la cual va desde el suelo hasta el final de la atmósfera, sobre una unidad de superficie, por lo que ésta varía con la altitud donde se mida, entre otros factores (Birkel, 2013).

Por otro lado, Çengel y Boles (2003) plantean que es conveniente tratar al vapor de agua en el aire atmosférico como un gas ideal, dado que es posible sacar provecho de esa condición sin mucho sacrificio en la exactitud (menos del 0,2% para presiones menores a 12,3kPa, que corresponde a la presión de saturación del agua a 50°C), así, el aire atmosférico se puede tratar como la mezcla de dos gases ideales: aire seco y vapor de agua:

$$P_{atm} = P_{vapor} + P_{aire-seco} \tag{2.5-1}$$

Por lo que se define la *presión parcial de vapor de agua* ($P_{vapor}$) como la presión que ejercería el vapor si existiera sólo a la temperatura y volumen del aire atmosférico.

#### *2.5.2.1 Presión de saturación del vapor de agua a cierta temperatura*

Según Alduchov y Eskridge (1994), el vapor del agua pura en estado de equilibrio con un plano superficial de agua pura o hielo a una misma presión y temperatura se dice estar saturado. La presión de vapor en este estado de equilibrio se conoce como la presión de saturación de vapor de agua y, la misma es función únicamente de la temperatura (según una ecuación llamada de Clapeyron – Clausius).

Los autores anteriores proponen aproximaciones (desarrolladas por ellos mismos) para el cálculo de la presión de saturación del vapor de agua en dos casos: sobre una superficie de agua líquida y sobre una superficie de agua sólida, y añaden un factor de corrección para dichas expresiones, cuando se considera el vapor dentro del aire atmosférico para así obtener la *presión de saturación de vapor de agua para aire atmosférico*.

#### *2.5.2.2 Sobre una superficie de agua líquida*

La siguiente fórmula es para la presión de saturación de vapor puro sobre una superficie de agua líquida.

$$P_{sat-h2o@T_{\circ C}} = 6{,}1094e^{17{,}625T_{\circ C}/243{,}04+T_{\circ C}} \qquad (2.5\text{-}2)$$

Donde $T_{\circ C}$ es la temperatura en grados Celsius de la atmósfera de vapor de agua sobre la superficie de agua.

Para el aire atmosférico, se tiene la siguiente corrección:

$$P_{sat-h2o-a@T_{\circ C}} = P_{sat-h2o@T_{\circ C}}.\,1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}} \qquad (2.5\text{-}3)$$

#### *2.5.2.3 Sobre una superficie de agua sólida*

Con respecto a la presión de saturación de vapor puro sobre una superficie de agua sólida.

$$P_{sat-h2o@T_{\circ C}} = 6{,}1121e^{22{,}587T_{\circ C}/273{,}86+T_{\circ C}} \qquad (2.5\text{-}4)$$

Donde $T_{\circ C}$ es la temperatura en grados Celsius de la atmósfera de vapor de agua sobre la superficie de hielo.

Para el aire atmosférico, se tiene la siguiente corrección:

$$P_{sat-h2o-a@T_{\circ C}} = P_{sat-h2o@T_{\circ C}}.\,0{,}99882e^{0{,}000008P_{atm}} \qquad (2.5\text{-}5)$$

#### *2.5.2.4 Temperatura de Saturación o de Punto de Rocío*

Según Çengel y Boles (2003), la temperatura de punto de rocío se define como la temperatura a la que se inicia el proceso de condensación de la humedad en el aire si éste se enfría a presión constante, y esta temperatura, a su vez, según los mismos autores, es la temperatura de saturación del agua correspondiente a la presión de vapor dada.

#### *2.5.2.5 Variación de la presión según la altitud del lugar de prueba*

De acuerdo con el procedimiento descrito por Fernández (2014), la expresión que desarrolla para determinar esta variación es un tipo de ecuación barométrica que incluye la influencia

de la humedad ambiental, sin embargo, para la determinación in situ de ésta humedad, el autor escogió, por su sencillez y practicidad, la aproximación de cálculo por medio de las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco de un psicrómetro.

Un método que requiere que se cuente con la presión atmosférica local, por lo cual, contando con la suposición de que el vapor de agua no va a representar un porcentaje superior al 1% de la masa del aire, se podría ignorar ese porcentaje de masa, con el fin de obtener otra expresión la cual, aunque subestimaría la presión atmosférica, es más práctica para lograr el fin inicial:

$$P_{atm-altitud} \approx 101325.\, e^{-\left(\frac{28{,}96\mathrm{m}}{R.T_K}\right).9{,}81.Altitud} \approx 101325.\, e^{-\frac{34{,}17x10^{-3}}{T_K}.Altitud} \quad (2.5\text{-}6)$$

### 2.5.3 Humedad

#### *2.5.3.1 Humedad absoluta o razón de mezcla*

Çengel y Boles (2003) definen a la humedad absoluta o específica, como la que precisa la masa de vapor de agua presente en una unidad de aire seco.

$$\omega = \frac{m_{vapor}}{m_{aire-seco}} \tag{2.5-7}$$

La razón anterior se expresa en kilogramo de vapor de agua por kilogramo de aire seco, además, los autores anteriores explican que, por trabajarse con gases ideales, la ecuación puede expresarse de la forma:

$$\omega = \frac{m_{vapor}}{m_{aire-seco}} = \frac{P_{vapor}/R_{vapor}}{P_{aire-seco}/R_{aire-seco}} = 0{,}622.\frac{P_{vapor}}{P_{aire-seco}} = 0{,}622.\frac{P_{vapor}}{P_{atm}-P_{vapor}} \tag{2.5-8}$$

Dónde las constantes "$R_{vapor}$" y "$R_{aire-seco}$" corresponden a las constantes de los gases para el vapor de agua y el aire, las cuales provienen de la división de la constante universal de los gases "R" entre la masa molar de cada gas.

**Tabla 1**: Constantes para los gases

| Constante | Valor | Unidades |
|---|---|---|
| $R$[1] | 8,314472 | Pa.m$^3$/mol.K |
| Masa molar del agua ($M_v$)[1] | 18,01528 | g/mol |
| Masa molar del aire ($M_a$)[1] | 28,96 | g/mol |
| $R_{vapor}$ | 0,4617 | Pa.m$^3$/g.K |
| $R_{aire-seco}$ | 0,287 | Pa.m$^3$/g.K |

[1] Fuente: CRC Handbook of Chemistry and Physics (89th Edition)

Adicionalmente, para cuando se trabaja con aire atmosférico, Birkel (2013) se refiere a la humedad absoluta como razón de mezcla.

#### *2.5.3.2 Humedad relativa*

Çengel y Boles (2003) definen este concepto como la relación entre la cantidad de vapor de agua que el aire contiene y el valor máximo de humedad que éste puede llegar a contener a esa misma temperatura (valor de saturación) antes de que comience la condensación. Esta relación viene dada por la ecuación:

$$HR = \frac{m_{vapor}}{m_{sat@T}} = \frac{P_{vapor}}{P_{sat@T}} \quad (2.5\text{-}9)$$

Donde $P_{sat@T}$ corresponde a la presión de saturación del vapor de agua a una temperatura "$T$" dada, y $m_{sat@T}$ es la masa de vapor asociada a dicha presión.

Por otra parte, derivado de la ecuación anterior, se tiene que la presión parcial de vapor puede expresarse como sigue:

$$P_{vapor} = HR.P_{sat@T} \quad (2.5\text{-}10)$$

Entonces, se puede reescribir la ecuación (2.5-5) como sigue:

$$\omega = \frac{0{,}622.HR.P_{vapor@T}}{P_{atm} - HR.P_{vapor@T}} \quad (2.5\text{-}11)$$

### 2.5.4 Condensación en Aire Atmosférico

Según Birkel (2013), para el aire atmosférico, la condensación consiste en un cambio de estado del agua: de vapor de agua a agua líquida, esto al extraerse la energía necesaria para que la atracción intermolecular de las partículas sea mayor que la repulsión intermolecular entre ellas.

De acuerdo con Fetter (2001), el proceso de condensación en la atmósfera inicia cuando una masa de aire con una humedad relativa inferior al 100% es enfriada sin perder vapor, entonces, la humedad relativa se aproximará al 100% al tiempo que el aire se aproxima a la temperatura de punto de rocío. Cuando la masa de aire está saturada, la condensación puede comenzar a ocurrir, para lo cual, este proceso físico requiere de una superficie o núcleo sobre el cual formarse, de lo contrario, la masa de aire se sobresaturará (humedad relativa mayor al 100%) sin formación de precipitación de agua.

#### *2.5.4.1 Determinación de la Temperatura de Saturación o de Punto de Rocío*

Partiendo de la ecuación anteriormente definida para la humedad relativa:

$$HR = \frac{m_{vapor}}{m_{sat@T}} = \frac{P_{vapor}}{P_{sat@T}} \quad (2.5\text{-}12)$$

Donde, para una superficie líquida y aire atmosférico, se tiene que:

$$P_{sat@T} = P_{sat-h2o-a@T^{\circ}C} = \left(6{,}1094e^{17{,}625T^{\circ}C/243{,}04+T^{\circ}C}\right).1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}} \quad (2.5\text{-}13)$$

Se considera una masa de aire atmosférico con una humedad relativa inicial "$HR_1$" con una temperatura "$T_1$" y presión parcial de vapor constante (en otras palabras, que no existe transferencia de vapor desde o hacia dicha masa de aire y la presión atmosférica se mantiene constante):

$$HR_1 = \frac{P_{vapor}}{P_{sat@T_1}} \tag{2.5-14}$$

Si dicha masa de aire atmosférico experimenta un cambio desde su temperatura "$T_1$" hasta otra distinta "$T_2$", sin transferencia de masa (presión de vapor constante), la presión de saturación cambiará a otro valor "$P_{sat@T_2}$" y su humedad relativa cambiaría a otra "$HR_2$":

$$HR_2 = \frac{P_{vapor}}{P_{sat@T_2}} \tag{2.5-15}$$

Ahora, la razón entre ambas humedades relativas daría la siguiente expresión:

$$\frac{HR_1}{HR_2} = \frac{\frac{\cancel{P_{vapor}}}{P_{sat@T_1}}}{\frac{\cancel{P_{vapor}}}{P_{sat@T_2}}} = \frac{P_{sat@T_2}}{P_{sat@T_1}} \tag{2.5-16}$$

Luego, sustituyendo las presiones de saturación, mediante la ecuación (2.5.12):

$$\frac{HR_1}{HR_2} = \frac{\cancel{6{,}1094}e^{17{,}625T_2/243{,}04+T_2}.\cancel{1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}}}}{\cancel{6{,}1094}e^{17{,}625T_1/243{,}04+T_1}.\cancel{1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}}}} = \frac{e^{17{,}625T_2/243{,}04+T_2}}{e^{17{,}625T_1/243{,}04+T_1}} \tag{2.5-17}$$

En este momento, es fundamental recordar que la saturación del aire húmedo se presenta cuando su humedad relativa es igual a la unidad (que es lo mismo que el 100%), así, si "$HR_2 = 1$" en la expresión matemática anterior:

$$\frac{HR_1}{1} = \frac{e^{17{,}625T_2/243{,}04+T_2}}{e^{17{,}625T_1/243{,}04+T_1}} \tag{2.5-18}$$

Si se desarrolla la ecuación anterior, con el fin de despejar la temperatura desconocida "$T_2$", a la cual la humedad relativa "$HR_2$" es igual a la unidad (por lo cual, "$T_2$" corresponde con la temperatura de saturación), se obtiene la siguiente expresión:

$$T_{sat_sl} = T_2 = \frac{243{,}04.\ln\left(HR_1.e^{17{,}625T_1/243{,}04+T_1}\right)}{17{,}625-\ln\left(HR_1.e^{17{,}625T_1/243{,}04+T_1}\right)} \tag{2.5-19}$$

Nótese que la ecuación anterior es para la temperatura de saturación o de punto de rocío para una masa de aire a cierta temperatura inicial "$T_1$" y humedad relativa inicial "$HR_1$", sobre

una superficie de agua líquida. Según se comprobó en el programa creado para el cálculo de la masa de condensación y la carga térmica en este proyecto, existen valores de humedad relativa y temperatura de masa de aire que producen valores por debajo del punto de congelación supuesto para el agua (0°C), por lo que representan una restricción al funcionamiento del diseño.

Para el caso de una superficie de agua sólida, si se parte de las ecuaciones análogas para dicha situación, se obtiene:

$$T_{sat_ss} = T_2 = \frac{273{,}86.\ln\left(HR_1.e^{22{,}587T_1/273{,}86+T_1}\right)}{22{,}587-\ln\left(HR_1.e^{22{,}587T_1/273{,}86+T_1}\right)} \qquad (2.5\text{-}20)$$

### *2.5.4.2 Determinación de Humedad Relativa*

Según la Agencia Meteorológica de Japón (Japan Meteorological Agency (2013)), en un psicrómetro, cuando el flujo de calor hacia el bulbo húmedo desde el aire ambiental alcanza el equilibrio con el calor latente removido desde este bulbo debido a la evaporación, se puede derivar la siguiente ecuación, conocida como la ecuación psicrométrica de Sprung:

$$P_v = P_{sat@T_{bh}} - \left(\frac{A}{755}\right) P_{atm}(T_{bs} - T_{bh}) \qquad (2.2\text{-}21)$$

Donde, "$T_{bs}$" es la temperatura de bulbo seco en [°C], "$T_{bh}$" es la temperatura de bulbo húmedo o de saturación en [°C], "$P_{sat@T_{bh}}$" es la presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo en [hPa], "$P_v$" es la presión de vapor en [hPa], "$P_{atm}$" la presión atmosférica en [hPa] y "$A$" es la constante psicrométrica, la cual vale 0,50 cuando el bulbo húmedo no está congelado y 0,44 cuando lo está.

Luego, si se hace uso de las ecuaciones (2.5-2), (2.5-3) y (2.5-8), es posible determinar la humedad relativa en tres únicos pasos: primero, se estima la presión de saturación en [hPa] por medio de la expresión (2.5-22).

$$P_{sat@T_{bh}} = 6{,}1121e^{22{,}587T_{bh}/273{,}86+T_{bh}}.\,1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}} \qquad (2.5\text{-}22)$$

Seguidamente, se calcula la presión de vapor de agua en [hPa] por medio de la ecuación (2.5-21) y, finalmente, se estima la humedad relativa por medio de la expresión (2.5-23).

$$HR = \frac{m_{vapor}}{m_{sat@T}} = \frac{P_v}{P_{sat@T_{bh}}} \qquad (2.5\text{-}23)$$

### 2.5.5 Poder Evaporante del Aire y Evaporación

El Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México, en su publicación *Principios de hidrogeografía*, describe el poder evaporante del aire como la altura de agua que la atmósfera es capaz de absorber si dispone de toda el agua necesaria, y lo relaciona con el proceso físico de evaporación afirmando que el poder evaporante determina dicho proceso.

Puesto que en este proyecto se desea conservar el agua en el suelo, es necesario minimizar la exposición del mismo al aire atmosférico, pero, sin que el medio utilizado para este fin (película plástica del colector/retenedor de humedad) vaya a interrumpir la aireación del mismo y que vaya a generar un micro-efecto invernadero no-controlado.

# 3 Metodología

## 3.1 Área de Estudio

El área de estudio está contemplada en la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, en el Distrito de San Rafael, Cantón de San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica.

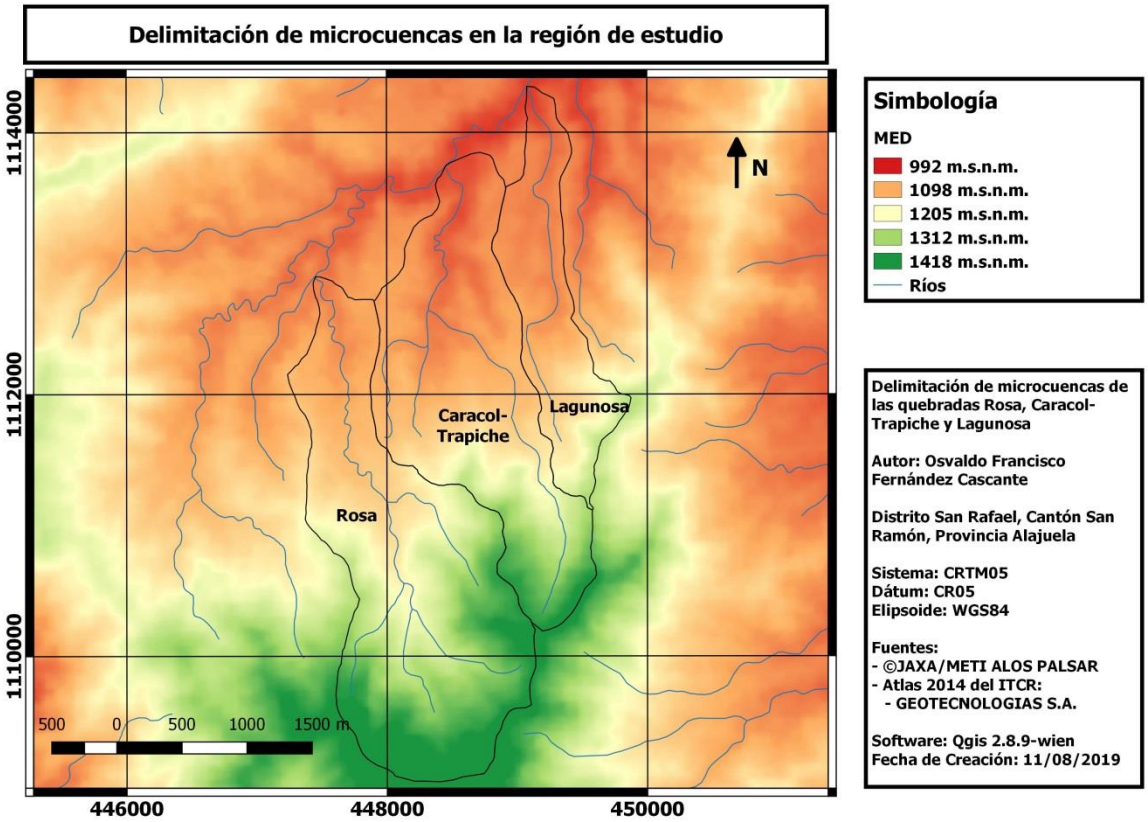


**Figura 4:** Mapa de delimitación de las microcuencas en la región de estudio

Por su ubicación, la zona de las microcuencas se encuentra dentro del área de conservación Cordillera Volcánica Central, la cual, según el SINAC (2019), está localizada en el centro del país, conformada casi en su totalidad por la Cordillera Volcánica Central, ésta resguarda 25 áreas silvestres protegidas y presenta una gran diversidad de ecosistemas naturales originados por la variedad de climas, altitudes y topografía irregular.

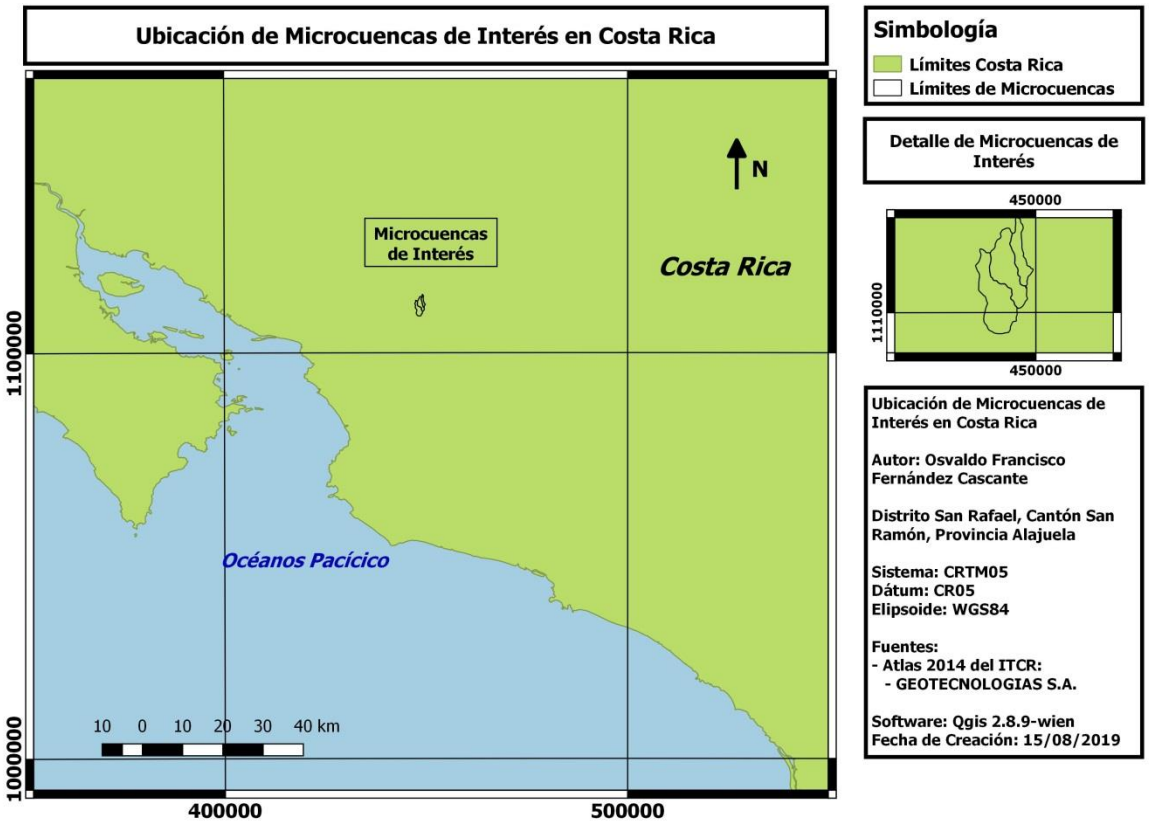


**Figura 5:** Mapa de ubicación de las microcuencas en Costa Rica

Asimismo, SINAC (2019) afirma que esta área ostenta más de 250 000 [ha] de bosques, los cuales cumplen un rol fundamental en la protección del recurso hídrico, básico para el desarrollo humano y socioeconómico de las urbes que la habitan. Administrativamente está establecida por una Sede Regional y 15 Unidades Funcionales, siete son áreas silvestres protegidas y ocho Oficinas.

**Figura 6:** Croquis de ubicación del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (Fuente: SINAC, http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/Paginas/default.aspx)

Por otro lado, de acuerdo con el mapa geológico de Costa Rica (del compendio de capas Atlas 2014, ver Figura 3), los materiales parentales del suelo, en las partes alta y media de la microcuenca, están compuestos por rocas volcánicas del período Terciario, formadas por coladas de lava, tobas y brechas tobaceas andesíticas, con una estratigrafía de rocas volcánicas intrusivas someras.

Mientras los materiales parentales del suelo en la parte baja de la microcuenca están compuestos por facies proximales de rocas volcánicas recientes del período Cuaternario, formadas por coladas de lava, aglomeradas, lahares y cenizas volcánicas, con una estratigrafía de rocas volcánicas intrusivas someras.

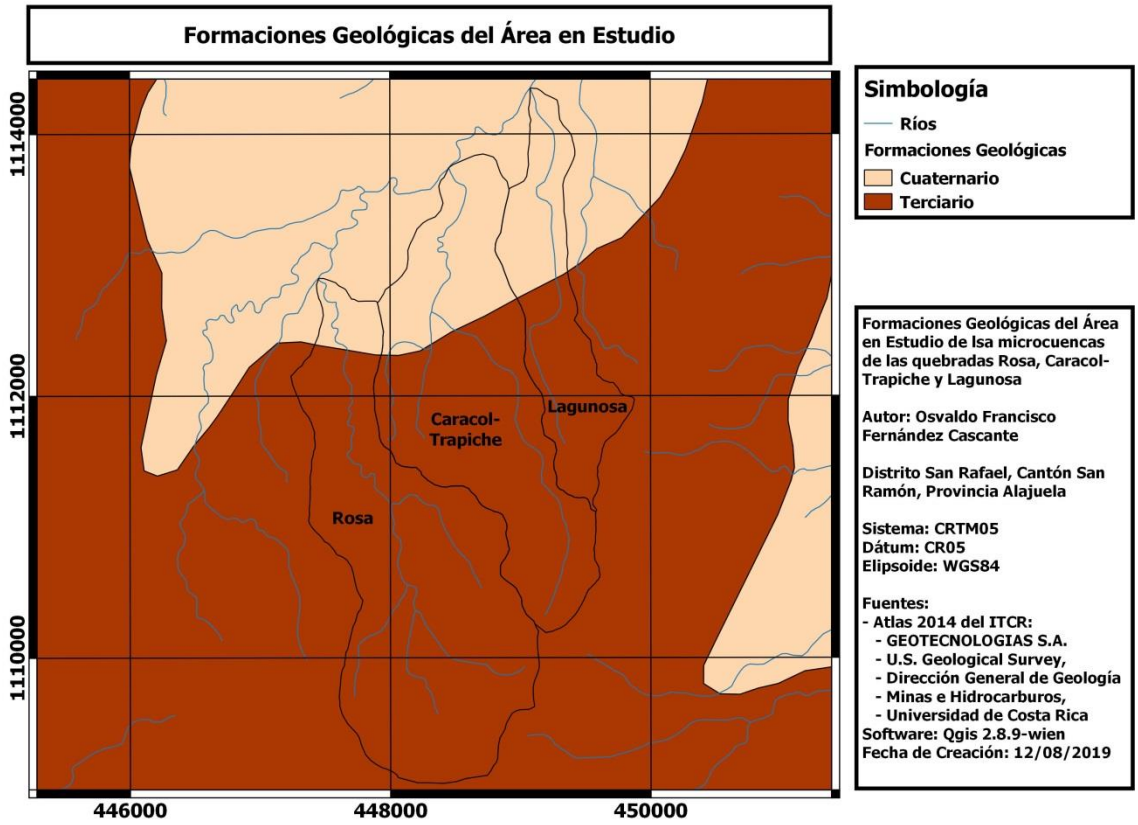


**Figura 7:** Mapa de las formaciones geológicas del área en estudio

Por otro lado, la zona de estudio está comprendida en su totalidad en la zona de vida del Bosque muy Húmedo Premontano, cuyas características se listan a continuación:

**Tabla 2:** Características de la zona de vida del área de estudio
Fuente: Centro Científico Tropical (CCT) / Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (2004).

| **Característica** | **Información** |
|---|---|
| Nombre | Bosque muy Húmedo Premontano |
| Piso | Premontano |
| Biotemperatura | 18- 24 °C |
| Precipitación | 2000 – 4000 mm anuales |

## 3.2 Especies de árboles seleccionadas

Tomando en cuenta las características climáticas y de altitud de las microcuencas, se seleccionaron las siguientes especies:

### 3.2.1 Cedro amargo (Cedrela odorata L.)

Algunas características valiosas para la consideración de esta especie de árbol son:

**Tabla 3:** Características para valoración de la especie: Cedro amargo (Cedrela odorata L.)
Fuente: Mundo Forestal (2020)

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Distribución | Desde México hasta gran parte de los países de Suramérica y el Caribe. |
| Altitud | Se le puede encontrar desde casi el nivel del mar hasta los 1200 m.s.n.m. |

### 3.2.2 Cenízaro (Samanea saman)

Algunas características valiosas para la consideración de esta especie de árbol son:

**Tabla 4:** Características para valoración de la especie: Cenízaro (Samanea saman)
Fuente: Crbio (2020)

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Distribución | Nativo de México hasta Brazil, Paraguay y Las Antillas. |
| Altitud | Se le puede encontrar en elevación entre 0 - 800 m.s.n.m. |

### 3.2.3 Sotacaballo (Zygia longifolia)

Algunas características valiosas para la consideración de esta especie de árbol son:

**Tabla 5:** Características para valoración de la especie: Sotacaballo (Zygia longifolia)
Fuente: Mundo Forestal (2020)

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Distribución | Es una especie nativa desde Honduras hasta Colombia. |
| Altitud | Se le pueden encontrar desde casi el nivel del mar hasta los 1000 m.s.n.m. |

### 3.2.4 Níspero Zapotillo (Manilkara zapota)

Algunas características valiosas para la consideración de esta especie de árbol son:

**Tabla 6:** Características para valoración de la especie: Níspero Zapotillo (Manilkara zapota)
Fuente: Mundo Forestal (2020)

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Distribución | También llamado chicozapote o chicle, es originario de México hasta Colombia y Venezuela. |
| Altitud | Se le encuentra desde el nivel del mar hasta los 900 m.s.n.m., y en ciertos lugares con condiciones especiales puede crecer hasta los 1000 o 1200 m.s.n.m. |

### 3.2.5 Almendro de montaña (Dipterix panamensis)

Algunas características valiosas para la consideración de esta especie de árbol son:

**Tabla 7:** Características para valoración de la especie: Almendro de montaña (Dipterix panamensis)
Fuente: Alves-Milho, 2018, pág. 5

| Característica | Descripción |
|---|---|
| Distribución | Se distribuye de Nicaragua a Colombia. |
| Altitud | Se le encuentra 0 a 500 m.s.n.m. |

Esta especie fue incluida por petición de los dueños de los terrenos donde se realizaron las pruebas del regenerador puntual de horizontes Ay 0 en las microcuencas en estudio, aunque por el rango de altitud de su hábitat se debería de descartar.

## 3.3 Visita exploratoria

Se realizó una visita exploratoria a la parte alta de la microcuenca, durante el miércoles 7 de agosto de 2019, se identificó que los suelos de las zonas por encima y alrededor de los pozos de captación del acueducto de agua potable de la ASADA de Calle Zamora y Rincón de Orozco, se encuentran altamente compactados y degradados producto del uso pecuario lechero de los terrenos.

Por otro lado, se colectó hojarasca en contacto con el suelo de los parches altos del bosque local, para la preparación posterior del biofermento necesario para la técnica del regenerador de horizontes A y O.

## 3.4 Población

Según la base de datos de Proyecciones Distritales de Población de Costa Rica 2000-2050 del Instituto Centroamericano de Población, para el 2019, la población del distrito sería de 10 546 personas, de las cuales 5 290 corresponden a hombres y 5 256 a mujeres.

Los habitantes de los poblados de Calle Zamora, Rincón de Orozco, Rincón de Mora, Alto Salas, San Rafael y la Unión del distrito depende del recurso hídrico proveído por las 3 microcuencas de las quebradas Rosa, Caracol-Trapiche y Lagunosa, mismas que desaguan al distrito hacia la cuenca del río Grande de San Ramón hacia el norte. Salvo las poblaciones circundantes al distrito Central de San Ramón que dependen de su acueducto municipal, estas son: los Parques, los Sesteos y las Estatuas, y las poblaciones de Berlín y Llano Brenes, cuyo acueducto local depende de las microcuencas de la vertiente sur de los Cerros del Aguacate. Aunado a lo anterior, con respecto a la procedencia exacta del agua potable utilizada en las viviendas, según Censos Nacionales de Población y Vivienda de Costa Rica 2011, para ese año:

**Tabla 8:** Cantidad de hogares según procedencia de agua potable, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011
(Fuente: *Base de datos de Proyecciones Distritales de Población de Costa Rica 2000-2050 del Instituto Centroamericano de Población*)

| Procedencia | Hogares |
|---|---|
| NA | 1 |
| Un acueducto rural o comunal (ASADAS o CAAR) | 1 052 |
| Un acueducto municipal | 11 |
| Un acueducto del A y A | 1 398 |
| Un pozo | 10 |
| Un río o quebrada | 190 |
| Otra fuente (Lluvia camión cisterna hidrante) | 35 |

Lo que revela que la mayoría de los hogares del distrito dependen de una fuente local administrada por una ASADA o por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados para obtener el agua que usan.

Sin embargo, de los 2 697 hogares censados en el distrito:

**Tabla 9:** Cantidad de hogares según tipo de sumidero de aguas negras, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011
(Fuente: *Base de datos de Proyecciones Distritales de Población de Costa Rica 2000-2050 del Instituto Centroamericano de Población*)

| El servicio sanitario está conectado a | Hogares |
|---|---|
| NA | 1 |
| Tanque séptico | 2 654 |
| Tiene salida directa a acequia zanja río o estero | 3 |
| Es de hueco de pozo negro o letrina | 35 |
| No tiene servicio sanitario | 4 |

La totalidad de hogares del distrito no cuentan con alcantarillado sanitario para tratamiento de aguas negras, lo que representa una grave amenaza para la calidad del recurso las fuentes subterráneas de agua potable.

Lo cual, unido a una demanda de agua potable de 20 litros por persona, para la población proyectada para el 2019, que daría como resultado 53940 litros diarios que los acueductos deben proveer, pone a los pobladores y actores de las microcuencas del distrito en una encrucijada respecto a la gestión integral del recurso agua con el fin de sobrevivir.

Las actividades económicas de las familias en el distrito son, en su mayoría, trabajos en el sector servicios, fuera y dentro del mismo, así como actividades agropecuarias relacionadas con el cultivo de café, hortalizas y ganadería de doble propósito.

**Tabla 10:** Ocupación por Hogar, San Rafael de San Ramón, Alajuela, año 2011
(Fuente: *Base de datos de Proyecciones Distritales de Población de Costa Rica 2000-2050 del Instituto Centroamericano de Población*)

| Actividad | Familias |
|---|---|
| Nivel directo administración pública y empresa privada | 43 |
| Nivel profesional científico e intelectual | 626 |
| Nivel técnico y profesional medio | 322 |
| Apoyo administrativo | 214 |
| Venta locales y prestación de servicios directo | 806 |
| Agropecuarias agrícolas y pesqueras calificadas | 225 |
| Producción artesanal, construcción mecanizada, arte gráfica y manufactura calificadas | 458 |
| Operación de instalaciones máquinas y ensambladores | 263 |
| Ocupaciones elementales | 665 |

Además, los usos de los suelos locales, de acuerdo con el mapa de la figura 6 corresponden con bosques secundarios, plantaciones de café y usos no forestales (como potreros y chaparrales), para 1998. Los cuales, luego de la visita realizada a la parte alta de la microcuenca, durante el miércoles 7 de agosto de 2019, éstas no han cambiado en gran medida.

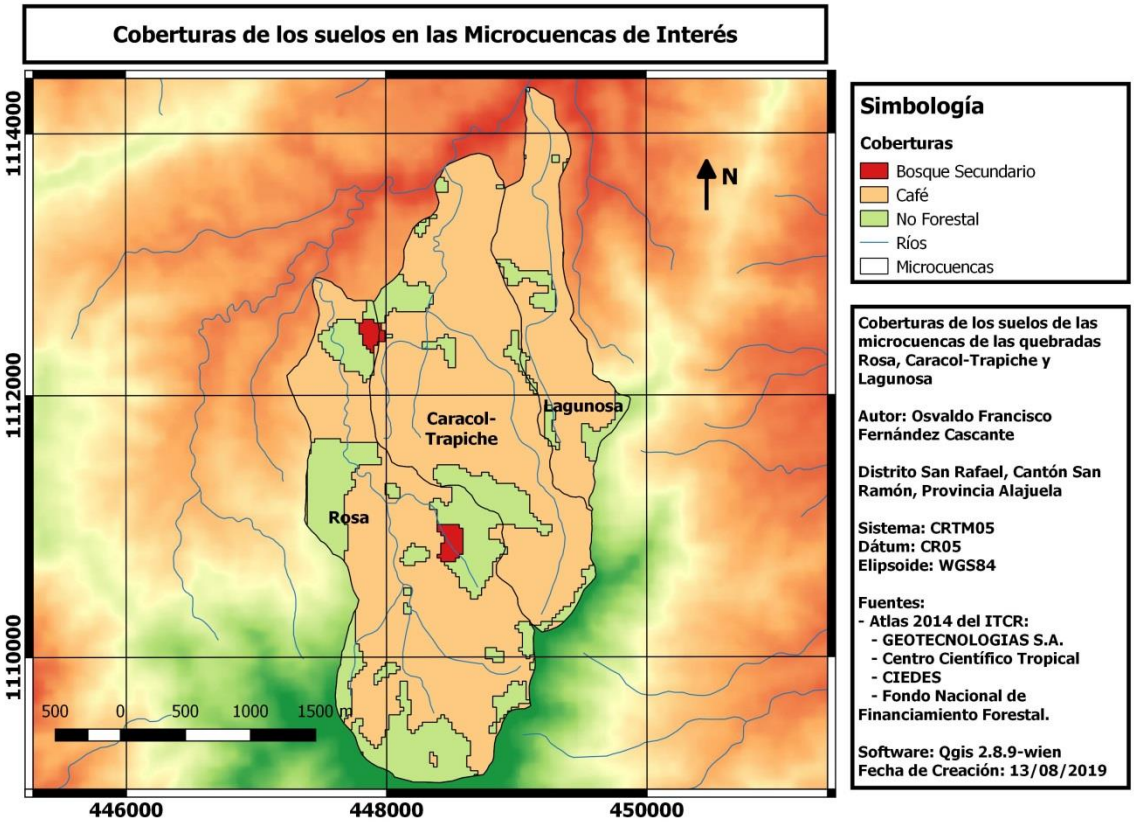


**Figura 8:** Mapa de las coberturas del área en estudio (1998)

## 3.5 Procedimientos metodológicos

### 3.5.1 Preparación de biofermento local

A partir de la metodología descrita por Herrera (2012), se realizará lo siguiente:

- Extraer hojarasca degradada de la base de árboles maduros del bosque local (a partir del bosque de la parte alta de la microcuenca).
- Hervir 1 galón de agua potable sin clorar y añadir ½ de tapa de dulce de caña.
- Dejar enfriar y añadir la hojarasca degradada.
- Dejar fermentar durante 30 días (proceso activo).
- Monitorear que el fermento no adquiera olor distinto a la fermentación alcohólica.
- Extraer los microorganismos, por medio de filtración, para su uso.

### 3.5.2 Regenerador de Horizontes A y O

La técnica que se utilizará en las pruebas de campo y que será sujeto de evaluación será una adaptación de la de hoyos Zaï modificada por Yacouba Sawadogo, pero adaptada para evitar pérdidas de materia orgánica por gravedad, en tres sitios de las pendientes de la zona alta de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche. Así como por la incorporación de un captador del precipitación y retenedor de evapotranspiración.

**Figura 9:** Técnica modificada de hoyos Zaï, realizada por Yacouba Sawadogo
(Fuente: https://haimaneltroudi.com/yacouba-sawadogo-el-hombre-volvio-fertil-el-desierto/)

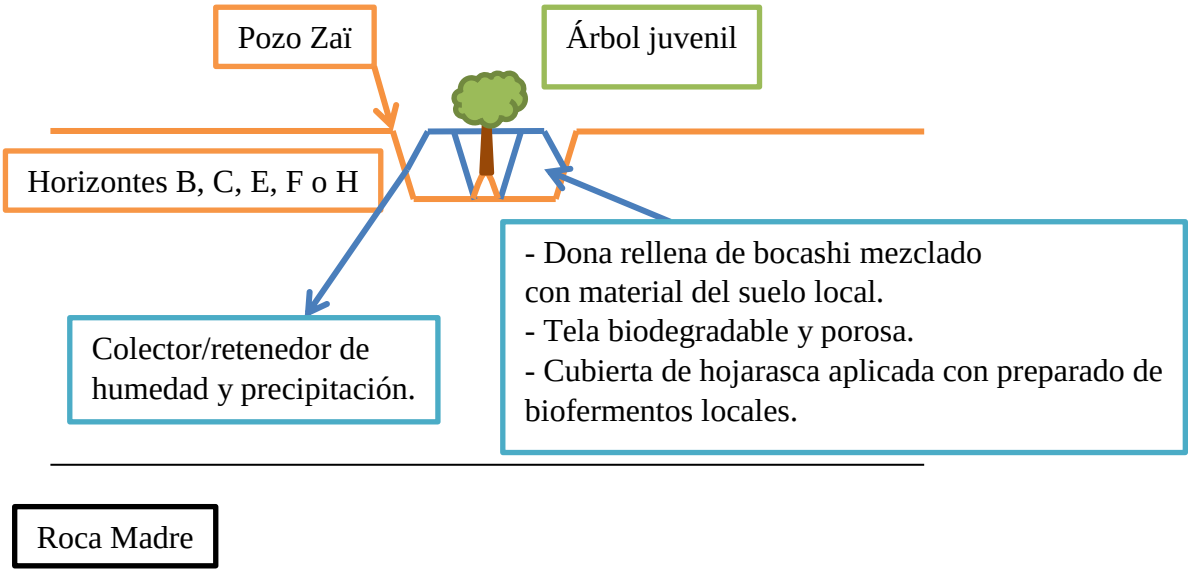


**Figura 10:** Diagrama simplificado del diseño del regenerador de horizontes A y O, **corte trasversal**

### 3.5.3 Pruebas de Movimiento del Agua en el Suelo

#### *3.5.3.1 Infiltración del agua en el suelo en campo*

Este procedimiento se pensó que podría haberse realizado al inicio de la práctica como línea bases y una vez por mes durante 3 meses posteriores al inicio de la prueba.

Se seguiría el procedimiento de campo propuesto por Hernández y Cabalceta (1999). Los instrumentos y materiales necesarios incluyen el uso de 2 anillos concéntricos de hierro (donde el cilindro más pequeño debe tener un diámetro interno mínimo de 30cm y el cilindro exterior debe exceder al del más pequeño en aproximadamente 20cm), un trozo de tela, martillo para introducir los cilindros en el suelo, un trozo de madera, tiza, regla de 30cm, reloj, recipientes o mangueras para llevar agua.

Lamentablemente el equipo disponible en el laboratorio de Suelos de la Universidad de Costa Rica no era apto para trabajar en las pendientes con los puntos (pesaban en conjunto cerca de 15 kg), por cuestiones de manipulación y uso.

#### *3.5.3.2 Conductividad hidráulica*

Hernández y Cabalceta (1999) la definen como la capacidad del suelo saturado de permitir el movimiento del agua a través de sus poros. A diferencia de la infiltración, este movimiento ocurre cuando los poros del suelo se encuentran saturados o llenos de agua. La utilidad más importante de conocer esta propiedad del suelo es el cálculo de las fórmulas de drenaje.

Se hará uso de un método modificado para medir la conductividad hidráulica propuesto por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano, el cual se utilizó en el laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica. El mismo consiste en una simplificación del

método de Hernández y Cabalceta (1999) y requiere de un montaje como el mostrado en la figura 11.

La modificación propuesta consiste en:

- Se tapa el extremo inferior del cilindro con la muestra haciendo uso de un papel de filtro especial para suelo y se asegura con una banda de goma.
- Se saturan las muestras de suelo durante 24 horas.
- Se aplica directamente agua potable al cilindro de muestra con una pipeta llena de 100 mL.
- Se aplica el agua al cilindro hasta que alcanza el borde del mismo y comienza a contar el tiempo.
- Cada 15 minutos se repone el agua hasta el borde del cilindro y se mide el volumen aplicado.

**Figura 11:** Método modificado para medir la conductividad hidráulica propuesto por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano

### 3.5.4 Prueba de Supervivencia del Arbolito

Prueba empírica de observación semanal periódica durante el primer año y segundo año de sembrado en la zona alta de las quebradas con respecto a la supervivencia y crecimiento de brotes, ramas y desarrollo horizontal de sistema radicular.

### 3.5.5 Prueba de Determinación de Humedad en Suelos

Para futuros trabajos, debido al fallo técnico de los sensores remotos de humedad del modelo "Soil Humidity Sensor (Hygrometer)", se recomienda el uso de la metodología empleada por Fernández-Cascante (2014) para la determinación de la humedad relativa presente en el aire cercano al suelo.

#### *3.5.5.1 Variación de la presión según la altitud del lugar de prueba*

Para esta metodología, si se recuerda lo dicho sobre la presión atmosférica en la sección 2.5.2.1, ésta se define como el peso de una columna de aire atmosférico sobre una unidad de superficie terrestre. Asimismo, se recuerda que esta presión varía dependiendo de la altitud donde se mida, entre otros factores. Ahora, si se supone que el factor predominante de variación es sólo la altura de la columna (se descarta los factores meteorológicos pues su análisis escapa a los objetivos y posibilidades de este proyecto de tesis), sería posible deducir una ecuación para su predicción, según la altitud, tomando en cuenta las variables y propiedades de una columna de aire de la siguiente figura.

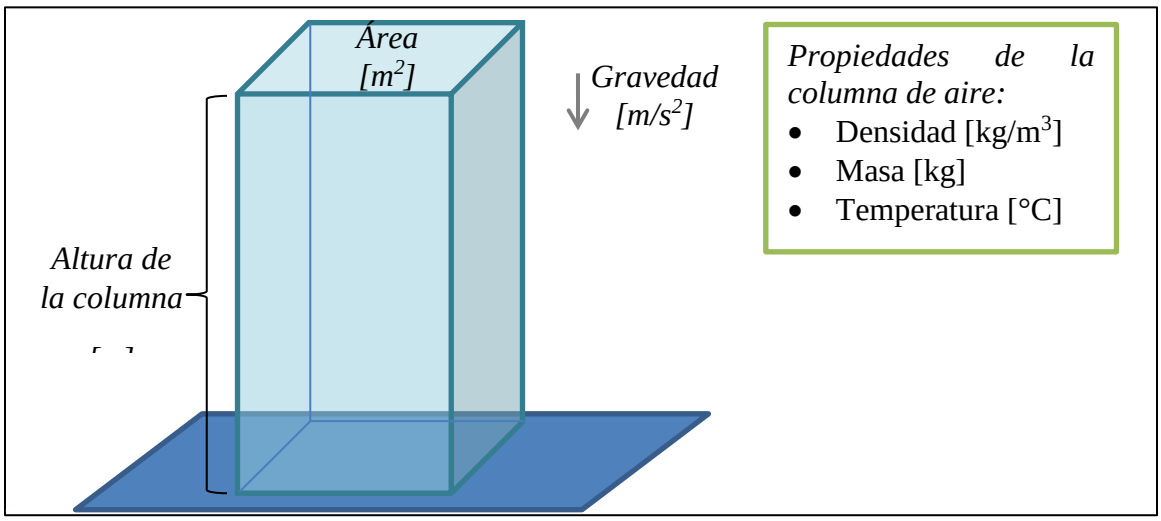


**Figura 12:** Propiedades de interés de una columna de aire atmosférico para la determinación de la ecuación predictiva de presión atmosférica según la altitud (Fuente: Fernández, 2014).

Inicialmente, se comienza por la expresión para la presión atmosférica presentada en la ecuación (2.5-1):

$$P_{atm} = P_{vapor} + P_{aire-seco} = \frac{Peso_{col}}{Area} = \frac{m_{col} \cdot g}{Area} \qquad (3.4\text{-}1)$$

Donde "$m_{col}$" es la masa de la columna de aire, "$g$" la constante gravitacional del planeta Tierra y "$Area$" es el área de la base de la columna de aire. Ahora, se sabe que la masa de aire de la columna puede expresarse en función de la densidad de ésta ($\rho_{aire}$) y el volumen que ocupa ($V_{col}$):

$$P_{atm} = \frac{m_{col} \cdot g}{Area} = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{col} \cdot g}{Area} = \frac{\rho_{aire} \cdot (\cancel{Area} \cdot z_{col}) \cdot g}{\cancel{Area}} = \rho_{aire} \cdot z_{col} \cdot g \qquad (3.4\text{-}2)$$

Donde "$z_{col}$" es la altura de la columna de aire desde la superficie de la Tierra. Luego, desde el nivel del mar hasta el borde de la atmósfera, se supone que la presión variará entre el valor estándar de presión atmosférica de $P_{atm-bajo} = 101{,}325 kPa$ (a cero metros sobre el nivel del mar sobre cierto paralelo del Hemisferio Norte, según C. Birkel (2013)) a $P_{atm-superior} = 0Pa$ (en el borde de la atmósfera terrestre donde comienza el vacío espacial). Ahora, se utiliza una adaptación del concepto de volumen de control aplicado a la columna de aire, para realizar un análisis diferencial (Figura 14).

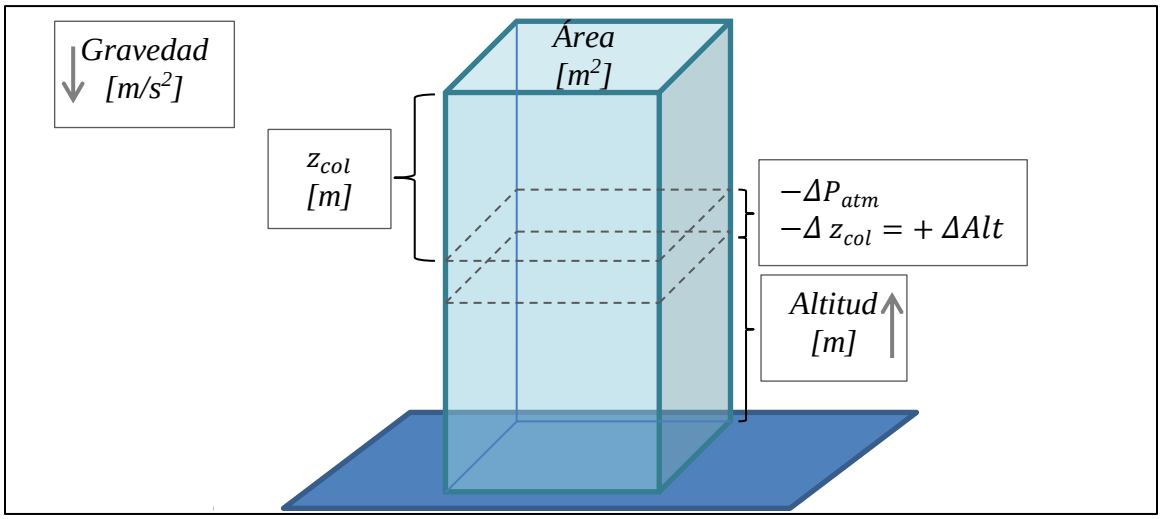


**Figura 13:** Volumen de control para una columna de aire atmosférico al aumentar la altitud

Así, para el volumen de control, se plantea la siguiente ecuación, con base en la expresión (3.4-2), en dirección creciente de la altitud y decreciente de la altura de la columna de aire atmosférico:

$$P_{atm} - \Delta P_{atm} = \rho_{aire} \cdot (z_{col} - \Delta z_{col}) \cdot g = \rho_{aire} \cdot (z_{col} + \Delta Alt) \cdot g \qquad (3.4\text{-}3)$$

Si se considera a nivel infinitesimal (derivando), se reescribe la ecuación como:

$$-dP_{atm} = \rho_{aire}.(dAlt).g \tag{3.4-4}$$

Mediante la expresión (2.3-35), es posible sustituir la densidad del aire atmosférico en la ecuación anterior:

$$-dP_{atm} = \left(\frac{1+\omega}{461{,}56.(0{,}62198+\omega)}.\frac{P_{atm}}{T_K}\right).(dAlt).g \tag{3.4-5}$$

Ahora, se define los límites de integración, para determinar una expresión que permita estimar la presión atmosférica a cierta altitud:

$$-\int_{P_{atm-bajo}}^{P_{atm-alto}} \frac{dP_{atm}}{P_{atm}} = \left(\frac{1+\omega}{461{,}56.(0{,}62198+\omega)}.\frac{1}{T_K}\right).g.\int_0^{Altitud}(dAlt) \tag{3.4-6}$$

Se obtiene que:

$$-\ln\left(\frac{P_{atm-alto}}{P_{atm-bajo}}\right) = \left(\frac{1+\omega}{461{,}56.(0{,}62198+\omega)}.\frac{1}{T_K}\right).g.(Altitud) \tag{3.4-7}$$

Si se despeja y sustituye el valor de la gravedad terrestre (valor promedio para la superficie de la Tierra según valores para el Ecuador y los polos dados por CRC Handbook of Chemistry and Physics (89th Edition)):

$$P_{atm-altitud} = 101325.e^{-\left(\frac{1+\omega_{altitud}}{461{,}56.(0{,}62198+\omega_{altitud})}.\frac{1}{T_K}\right).9{,}81.Altitud} \tag{3.4-8}$$

No obstante, la expresión anterior no toma en cuenta que la ecuación (2.5-35) es dependiente de la presión atmosférica a cierta altitud para el cálculo de las presión parcial de vapor de agua. Por lo cual, la expresión (3.4-8) no estaría completa para brindar una estimación acertada de presión atmosférica, de no contar con una razón de mezcla a la altitud dada.

Entonces, si se considera al aire atmosférico de la columna como un gas ideal, es posible aplicar la expresión de la ley de los gases ideales a éste, la cual, según Bauer y Westfall (2011), está dada por:

$$P_{atm}.V_{col} = n_{col}.R.T_K \tag{3.4-9}$$

Donde "$n_{col}$" es el número de moles del aire de la columna, el cual puede ser expresado como el cociente entre la masa total de la columna y la masa molar del aire atmosférico.

$$P_{atm}.V_{col} = \frac{m_{col}}{M_{col}}.R.T_K \qquad (3.4\text{-}10)$$

Donde "$M_{col}$" es la masa molar del aire atmosférico, para cierta humedad relativa. Para ésta masa molar, tomando en cuenta lo expuesto por Birkel (2013) al respecto de la composición general de la atmósfera, se propone una expresión, en la cual, del 99% al 100% de la masa molar va a estar compuesto por aire seco y de un 0% al 1% corresponderá a vapor de agua, según la humedad relativa.

$$M_{col} = M_a(1 - 0{,}01 * HR) + M_v * 0{,}01 * HR \qquad (3.4\text{-}11)$$

Si se sustituye los valores para las masas molares del aire seco y del vapor de agua en la expresión anterior, se obtiene la siguiente ecuación:

$$M_{col} = 28{,}96\text{m} * (1 - 0{,}01 * HR) + 18{,}01528\text{m} * 0{,}01 * HR \qquad (3.4\text{-}12)$$

Al desarrollar:

$$M_{col} = 28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR \qquad (3.4\text{-}13)$$

Ahora, si se regresa a la ecuación (5.2-10), se puede sustituir la masa molar de la columna de aire atmosférico por la expresión anterior:

$$P_{atm}.V_{col} = \frac{m_{col}}{28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR}.R.T_K \qquad (3.4\text{-}14)$$

Se divide por "$V_{col}$" la ecuación anterior, y se despeja la densidad de la columna, la cual corresponde a una aproximación a la densidad del aire húmedo:

$$\rho_{col} = \frac{(28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR).P_{atm}}{R.T_K} \approx \rho_{aire} \qquad (3.4\text{-}15)$$

Si se regresa a la expresión (5.2-4) y se sustituye la densidad del aire, se obtiene:

$$-dP_{atm} = \frac{(28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR).P_{atm}}{R.T_K}.(dAlt).g \qquad (3.4\text{-}16)$$

Ahora, se vuelve a definir los límites de integración, para determinar una expresión que permita estimar la presión atmosférica a cierta altitud:

$$-\int_{P_{atm-bajo}}^{P_{atm-alto}} \frac{dP_{atm}}{P_{atm}} = \left(\frac{28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR}{R.T_K}\right).g.\int_0^{Altitud}(dAlt) \qquad (3.4\text{-}17)$$

Se obtiene que:

$$-\ln\left(\frac{P_{atm-alto}}{P_{atm-bajo}}\right) = \left(\frac{28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR}{R.T_K}\right).g.(Altitud) \qquad (3.4\text{-}18)$$

Si se despeja:

$$P_{atm-altitud} = 101325.e^{-\left(\frac{28{,}96\text{m} - 0{,}1094472\text{m} * HR}{R.T_K}\right).9{,}81.Altitud} \qquad (3.4\text{-}19)$$

Ahora, esta expresión es un tipo de ecuación barométrica que incluye la influencia de la humedad ambiental, sin embargo, para la determinación in situ de ésta humedad, se escoge, por su sencillez y practicidad, la aproximación de cálculo por medio de las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco de un psicrómetro, y este método requiere que se cuente con la presión atmosférica local, por lo cual, contando con la suposición de que el vapor de agua no va a representar un porcentaje superior al 1% de la masa del aire, se podría ignorar ese porcentaje de masa, con el fin de obtener otra expresión la cual, aunque subestimaría la presión atmosférica, es más práctica para lograr el fin inicial:

$$P_{atm-altitud} \approx 101325.e^{-\left(\frac{28{,}96\text{m}}{R.T_K}\right).9{,}81.Altitud} \approx 101325.e^{-\frac{34{,}17x10^{-3}}{T_K}.Altitud} \qquad (3.4\text{-}20)$$

#### *3.5.5.2 Determinación de Humedad Relativa*

Según la Agencia Meteorológica de Japón (Japan Meteorological Agency, 2013), en un psicrómetro, cuando el flujo de calor hacia el bulbo húmedo desde el aire ambiental alcanza el equilibrio con el calor latente removido desde este bulbo debido a la evaporación, se puede derivar la siguiente ecuación, conocida como la ecuación psicrométrica de Sprung:

$$P_v = P_{sat@T_{bh}} - \left(\frac{A}{755}\right) P_{atm}(T_{bs} - T_{bh}) \qquad (3.4\text{-}21)$$

Donde, "$T_{bs}$" es la temperatura de bulbo seco en [°C], "$T_{bh}$" es la temperatura de bulbo húmedo o de saturación en [°C], "$P_{sat@T_{bh}}$" es la presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo en [hPa], "$P_v$" es la presión de vapor en [hPa], "$P_{atm}$" la presión atmosférica en [hPa] y "$A$" es la constante psicrométrica, la cual vale 0,50 cuando el bulbo húmedo no está congelado y 0,44 cuando lo está.

Luego, si se hace uso de las ecuaciones (2.5-2), (2.5-3) y (2.5-8), es posible determinar la humedad relativa en tres únicos pasos: primero, se estima la presión de saturación en [hPa] por medio de la expresión (3.4-22).

$$P_{sat@T_{bh}} = 6{,}1121e^{22{,}587T_{bh}/273{,}86+T_{bh}}.\,1{,}00071e^{0{,}0000045P_{atm}} \qquad (3.4\text{-}22)$$

Seguidamente, se calcula la presión de vapor de agua en [hPa] por medio de la ecuación (3.4-21) y, finalmente, se estima la humedad relativa por medio de la expresión (3.4-23).

$$HR = \frac{m_{vapor}}{m_{sat@T}} = \frac{P_v}{P_{sat@T_{bh}}} \qquad (3.4\text{-}23)$$

## 3.6 Resultados Esperados

- Se generará una metodología para su uso en la gestión integral de los recursos suelo y agua, de la práctica probada aquí y como resultado, se cuantificará cada una de estas variables:
    - Tasa de supervivencia de los árboles plantados por:
        - Retención de nutrientes disponibles.
        - Pérdidas de agua por escorrentía superficial.
    - Infiltración del agua en los suelos.
    - Cantidad de agua disponible durante la estación seca para supervivencia del arbolito, por medio de sensores remotos de humedad del modelo “Soil Humidity Sensor (Hygrometer)”.

# 4 Pruebas

## 4.1 Limitantes Técnicas de Estudio

Durante los procedimientos para validación del método del regenerador puntual de horizonte A y 0 se presentaron problemas técnicos para la realización de la prueba de infiltración, como se mencionó en la sección 3.4.3.1, por lo inadecuado de los equipos para llevarse con seguridad a los puntos de prueba.

Por otro lado, con respecto a la utilización de sensores remotos de humedad del modelo "Soil Humidity Sensor (Hygrometer)", a pesar de su promoción para su uso para aplicaciones agrícolas por parte del distribuidor autorizado en Costa Rica, se tuvo los siguientes problemas:

- Al utilizar la tarjeta Adafrut®, programarla y acceder a las características remotas de los sensores de humedad "Soil Humidity Sensor (Hygrometer)" era necesario contar con un módem wifi de alta potencia en funcionamiento constante en las microcuencas, para adquisición de datos de forma constante.
- Los sensores de humedad "Soil Humidity Sensor (Hygrometer)" disponibles en el mercado costarricense son frágiles y no soportan la acción mecánica para introducirlos en los suelos compactados en los puntos de prueba.

Por lo cual se imposibilitó técnicamente la realización de las mediciones remotas de humedad en el suelo de la forma planteada al inicio del proyecto.

Sin embargo, por la importancia de las prueba para la validación de método, se realizó la comprobación de presencia de humedad en el suelo por medio del tacto y la visibilidad de vapor condensado en la superficie interna del captador/retenedor de humedad del regenerador de horizontes A y 0.

Asimismo, se planteó seguir una metodología modificada a la utilizada por Fernández-Cascante (2014), para conseguir de forma manual, para futuras pruebas posteriores al presente trabajo final de graduación, el dato de humedad en suelos.

## 4.2 Pruebas Microcuenca Caracol

Inicialmente, se procedió a colocar 8 puntos de prueba en 4 locaciones de la microcuenca de la quebrada Caracol, el 9 de setiembre de 2019, durante la mañana. Los mismos fueron colocados sin la cubierta retenedora/colectora de humedad, por motivo de las condiciones meteorológicas muy lluviosas que podrían generar sobresaturación de los suelos y pudrición de raíces, asimismo, para contar con puntos muestreales de comparación.

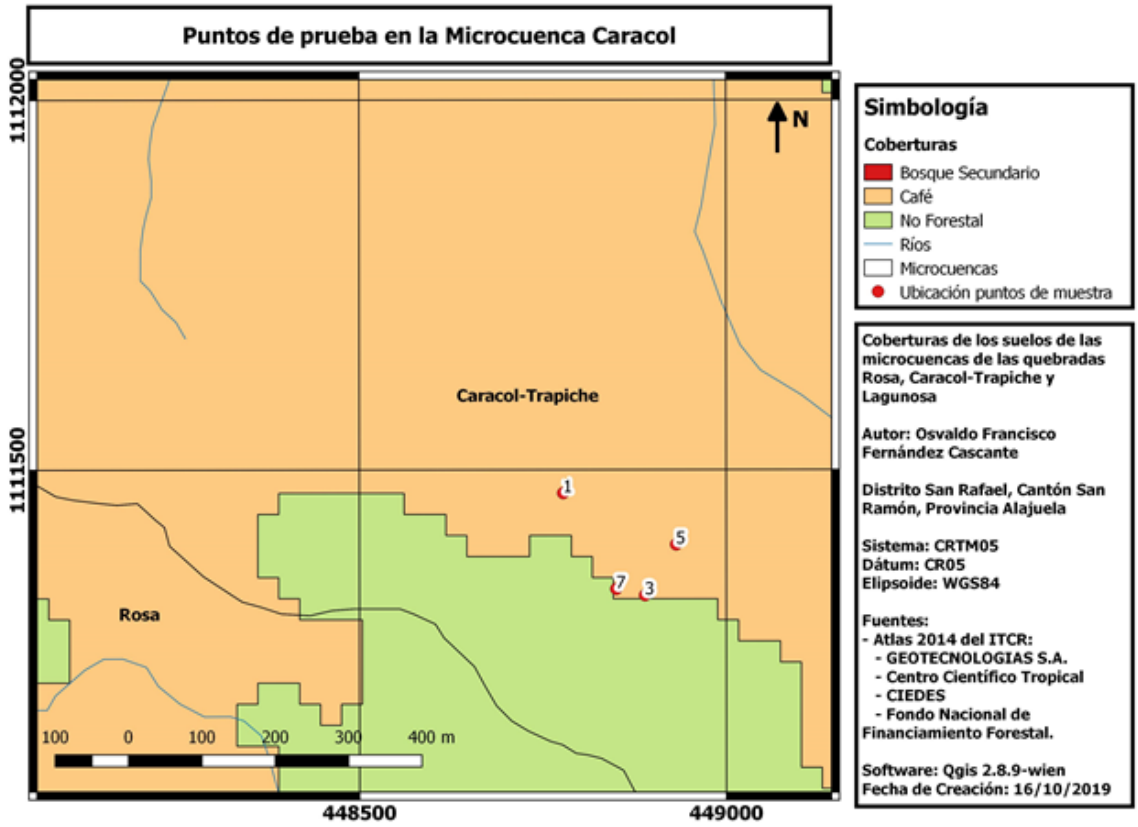


**Figura 14:** Mapa de los puntos de prueba en la Microcuenca Caracol-Trapiche

### 4.2.1 Punto 1: cilindro 5

Inicialmente, en la zona de pruebas, se seleccionó un punto, sobre la superficie donde se iba a plantar los árboles, para realizar la exploración de horizontes con el barreno y depositar los materiales extraídos de forma lineal sobre una superficie limpia para caracterizarlos.

**Figura 15:** Muestra obtenida con el Barreno, punto 1

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 11:** Ficha Técnica de Campo, Punto 1, Pendiente 35%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| B/C | 30 | 30 | 4/4 | Arcillosa | 5 |
| B/C | 15 | 45 | 4/6 | Arcillosa | 10 |
| C | 15 | 60 | 4/6 | Arcillosa | 10 |
| C | 30 | 90 | 4/6 | Arcillosa | 20 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 2 de octubre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 12:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 1, masa saturada = 0,4265 kg

| **Tiempo** **[minutos]** | **Volumen de Conducción** **[mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 1,5 |
| 30 | 2,0 |
| 45 | 2,5 |
| 60 | 3 |
| 75 | 3,5 |

La conductividad hidráulica se estabiliza entre 3,5 mL / 15 min y 3 mL / 15 min, cuyo rango es equivalente a [0,2 ; 0,233] mL/min.

El rango de la misma es una conductividad reducida y que evidencia una compactación inicial elevada que concuerda con la actividad que se desarrolla económicamente sobre este suelo: agricultura de café.

**Prueba de Supervivencia Inicial, punto 1**

**Figura 16:** Prueba de supervivencia inicial, punto 1, se plantaron árboles de cedro amargo (*Cedrela odorata*)

### 4.2.2 Punto 2: cilindro 3

Inicialmente, en la zona de pruebas, se seleccionó un punto, sobre la superficie donde se iba a plantar los árboles, para realizar la exploración de horizontes con el barreno y depositar los materiales extraídos de forma lineal sobre una superficie limpia para caracterizarlos.

**Figura 17:** Muestra obtenida con el Barreno, punto 2

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 13:** Ficha Técnica de Campo, Punto 2, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| B | 30 | 30 | 3/2 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 60 | 3/2 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 90 | 3/6 | Limosa | 5 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 2 de octubre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 14:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 2, masa saturada = 0,4690 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 1,7 |
| 30 | 0,7 |
| 45 | 0,8 |
| 60 | 0,9 |
| 75 | 0,4 |

La conductividad hidráulica se estabiliza entre 0,9 mL / 15 min y 0,4 mL / 15 min, cuyo rango es equivalente a $[0{,}06\,;0{,}0267]$ mL/min.

El rango de la misma es una conductividad muy reducida y que evidencia una compactación inicial elevada que concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: agricultura de café, paso de trabajadores e incursiones de ganado vacuno. Esto último implicó la incorporación de medidas de protección para el presente punto de prueba para evitar dichas incursiones de ganado: reforzado de la cerca de alambra de púas.

**Prueba de Supervivencia Inicial, punto 2**

**Figura 18:** Prueba de supervivencia inicial, punto 2, se plantó un árbol de cenízaro (*Samanea saman*)

### 4.2.3 Punto 3: cilindro 7

Inicialmente, en la zona de pruebas, se seleccionó un punto, sobre la superficie donde se iba a plantar los árboles, para realizar la exploración de horizontes con el barreno y depositar los materiales extraídos de forma lineal sobre una superficie limpia para caracterizarlos.

**Figura 19:** Muestra obtenida con el Barreno, punto 3

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 15:** Ficha Técnica de Campo, Punto 3, Pendiente 20%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| B | 30 | 30 | 2/1 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 60 | 2/1 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 90 | 2/1 | Limosa | 5 |

## Prueba de Conductividad Hidráulica

Realizada el día 2 de octubre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 16:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 3, masa saturada = 0,4320 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 2,2 |
| 30 | 1,6 |
| 45 | 1,2 |
| 60 | 1 |
| 75 | 1 |

La conductividad hidráulica se estabiliza en 1 mL / 15 min, lo cual es equivalente a [0,0667] mL/min.

La magnitud de la misma apunta a una conductividad muy reducida y que evidencia una compactación inicial elevada que concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: agricultura de café y paso de trabajadores.

## Prueba de Supervivencia Inicial, punto 3

**Figura 20:** Prueba de supervivencia inicial, punto 3, se plantó un árbol de cenízaro (*Samanea saman*)

### 4.2.4 Punto 4: cilindro 1

Inicialmente, en la zona de pruebas, se seleccionó un punto, sobre la superficie donde se iba a plantar los árboles, para realizar la exploración de horizontes con el barreno y depositar los materiales extraídos de forma lineal sobre una superficie limpia para caracterizarlos para realizar la descripción. Lamentablemente, la cámara de fotografías no permitió recuperar la fotografía del perfil obtenido con el barreno.

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 17:** Ficha Técnica de Campo, Punto 4, Pendiente 20%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| B | 30 | 30 | 3/3 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 60 | 3/4 | Limosa | 5 |
| B | 30 | 90 | 3/4 | Limosa | 5 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 2 de octubre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 18:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 4, masa saturada = 0,4490 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 0 |
| 30 | 0 |
| 45 | 0 |
| 60 | 0 |
| 75 | 0 |

La conductividad hidráulica no pasó de 0 mL / 15 min o 0 mL/min.

La magnitud de la misma es nula y apunta hacia una compactación inicial de suelo muy elevada que concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: paso de trabajadores del café, lugar de colocación de la cosecha del café, medición de la cosecha del café.

**Prueba de Supervivencia Inicial, punto 4**

**Figura 21:** Prueba de supervivencia inicial, punto 4, en las donas del regenerador puntual de horizontes A y 0, se plantaron árboles de zota caballo (*Zygia latifolia*).

### 4.2.5 Supervivencia semanal

| Prueba de Supervivencia Semanal, año 2019 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tarea** | **Setiembre** | | | | **Octubre** | | | | **Noviembre** | | | | **Diciembre** | | | |
| Punto 1 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 2 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 3 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 4 | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

**Supervivencia Final**

La última visita para comprobar la supervivencia de los arbolitos plantados en setiembre fue durante el domingo 12 de enero de 2020, por la mañana.

1. **Punto 1: árboles de cedro amargo (*Cedrela odorata L.*).**

**Figura 22:** Prueba de Supervivencia final, punto 1

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto y se evidencia que los arbolitos de cedro amargo han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 3 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y dos semanas iniciales de enero 2020.

2. **Punto 2: árbol de cenízaro (Samanea saman)**

**Figura 23:** Prueba de Supervivencia final, punto 2

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto y se evidencia que el arbolito de cenízaro ha generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 3 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y dos semanas iniciales de enero 2020.

Se confirma la pérdida de hojas, dado el comportamiento caducifolio de la especie. Por otro lado, la ausencia del colector/retenedor de humedad ha causado la proliferación de especies colonizadoras del potrero cercano: como plantas herbáceas y malezas.

3. **Punto 3: árbol de cenízaro (Samanea saman)**

**Figura 24:** Prueba de Supervivencia final, punto 3

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto y se evidencia que el arbolito de cenízaro ha generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 3 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y dos semanas iniciales de enero 2020.

Se confirma la presencia de un brote y un retraso en la pérdida de hojas, que no corresponde con el comportamiento caducifolio de la especie, probablemente debido a la atípica presencia de humedad en el suelo producto del regenerador puntual de suelos.

4. **Punto 4: árboles de sota caballo (Zygia longifolia).**

**Figura 25:** Prueba de Supervivencia final, punto 4

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto y se evidencia que los arbolitos de sota caballo han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 3 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y dos semanas iniciales de enero 2020.

Y aunque, uno de ellos fue aplastado por unos recolectores de café, desde la última semana de medición de supervivencia a finales de diciembre 2019, éste ha retoñado a pesar de las condiciones secas meteorológicas.

## 4.3 Pruebas Microcuenca Trapiche

En una segunda fecha más próxima a la estación seca, se procedió a colocar 10 puntos de prueba en 5 locaciones de la microcuenca de la quebrada Trapiche, el 22 de noviembre de 2019, durante la mañana. Los mismos fueron colocados con la cubierta retenedora/colectora de humedad, con una abertura central para evitar un micro efecto invernadero fatal para los arbolitos.

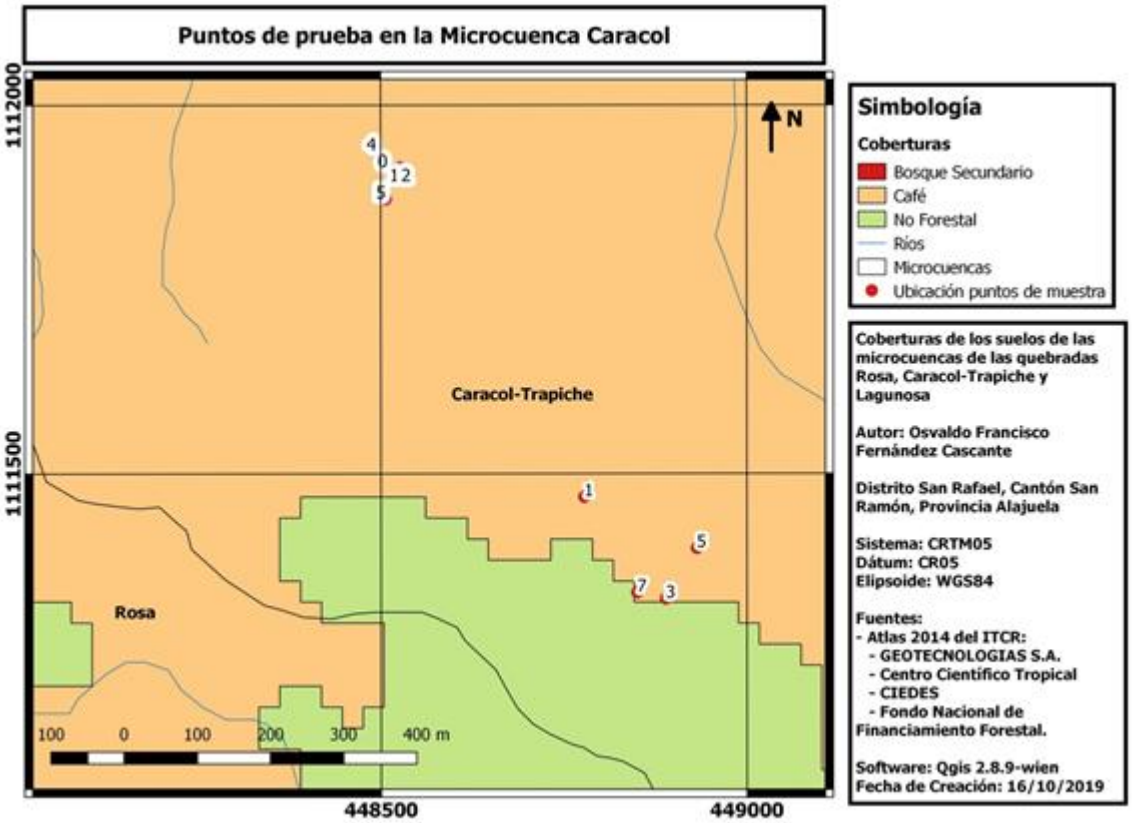


**Figura 26:** Mapa general de los puntos de prueba en la Microcuenca Caracol-Trapiche

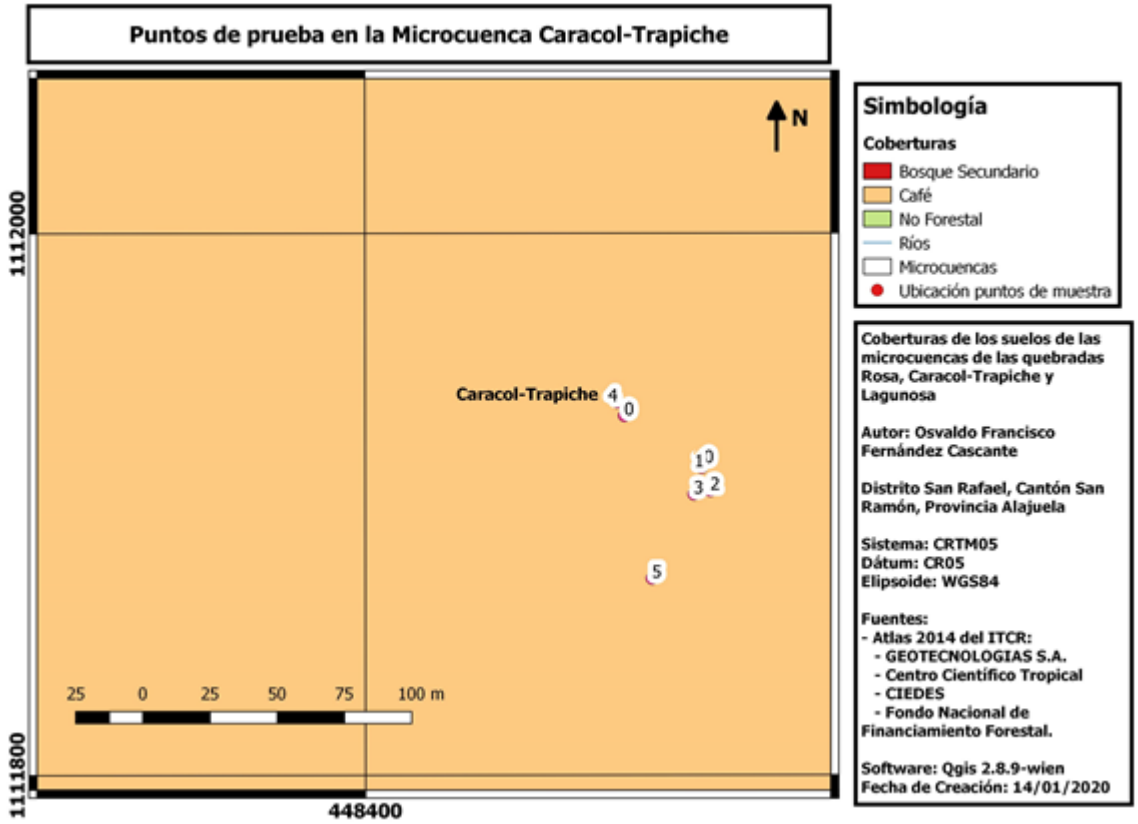


**Figura 27:** Mapa en detalle de los puntos de prueba en la Microcuenca Trapiche, los puntos cuya etiqueta ubican 2 árboles de almendro de montaña que se plantaron para usarse como control sin aplicar la técnica del regenerador puntual de horizontes A y 0

Para la presente sección, se aclara que inicialmente, en las 5 distintas zonas de pruebas, se seleccionó un punto, sobre la superficie donde se iba a plantar los árboles, para realizar la exploración de horizontes con el barreno y depositar los materiales extraídos de forma lineal sobre una superficie limpia para caracterizarlos.

Este procedimiento fue realizado para todos los 5 puntos de muestreo, de la forma como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 28:** Muestra obtenida con el Barreno, ejemplo en el punto 1

Luego se procedió a realizar una mezcla del abono orgánico tipo bocashi con el material del suelo en proporción 50/50, para generar un prototipo de material para el horizonte A artificial con más del 40% de materia orgánica. Asimismo, se aplicó el preparado de micro-organismos eficientes del bosque.

**Figura 29:** Mezcla del abono orgánico con el material del suelo local, ejemplo en el punto 1, para el relleno de la dona del regenerador puntual de horizontes A y 0.

Seguidamente, se procedió al rellenado de la dona de manta cruda del regenerador puntual de horizontes A y 0:

**Figura 30:** Rellenado de las donas del regenerador puntual de horizontes A y 0, ejemplo en el punto 1.

Finalmente:

1. Se plantó el arbolito en el centro de la dona.
2. Se cubrió la dona con hojarasca.
3. Se aplicó de nuevo el preparado de micro-organismos eficientes del bosque.
4. Se envolvió la dona con la película plástica captadora/retenedora de humedad.

**Figura 31:** Envoltura de la dona rellena del regenerador puntual de horizontes A y 0 con la película plástica captadora/retenedora de humedad, ejemplo del punto 4.

5. Se cubrió al regenerador puntual de horizontes A y 0 con hojarasca y se marcó con ramas para evitar que tanto personas como animales lo destruyeran. Lo cual valida la necesidad de contar con una protección general para la zona donde se aplicará la técnica de regeneración puntual de horizontes A y 0.

**Figura 32:** Regenerador puntual de horizontes A y 0 cubierto con hojarasca y marcado para evitar que tanto personas como animales lo destruyeras, ejemplo del punto 5.

### 4.3.1 Punto 1: cilindro 1

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 19:** Ficha Técnica de Campo, Punto 1, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| Ag | 30 | 30 | 3/2 | Arcillosa | 5 |
| Ag | 30 | 60 | 3/2 | Arcillosa | 5 |
| C | 30 | 90 | 3/4 | Arcillosa | 5 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 27 de noviembre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 20:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 1, masa saturada = 0,480 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 1,4 |
| 30 | 1 |
| 45 | 0,3 |
| 60 | 0,1 |
| 75 | 0 |

La conductividad hidráulica disminuyó a 0 mL / 15 min o 0 mL/min

La magnitud de la misma es nula y apunta hacia una acumulación profunda y laminar de arcillas dentro de la columna del cilindro, lo cual impermeabilizó la muestra.

### 4.3.2 Punto 2: cilindro 2

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 21:** Ficha Técnica de Campo, Punto 2, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| Ag | 30 | 30 | ¾ | Arcillosa | 5 |
| C | 30 | 60 | 4/4 | Arcillosa | 5 |
| C | 30 | 90 | 4/4 | Arcillosa | 5 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 27 de noviembre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 22:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 2, masa saturada = 0,4765 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 4,3 |
| 30 | 4 |
| 45 | 4 |
| 60 | 4,7 |
| 75 | 4,3 |

La conductividad hidráulica se estabiliza entre 4,3 mL / 15 min y 4,7 mL / 15 min, cuyo rango es equivalente a [0,2867 ; 0,313] mL/min.

El rango de la misma es una conductividad relativamente reducida pero, es una de las más altas obtenidas en los puntos muestreados. La misma concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: agricultura de café, con intercalado de una siembra de maíz. Es probable que este rango de infiltración se deba a que el suelo agrícola esté suelto por la acción del arado.

### 4.3.3 Punto 3: cilindro 3

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 23:** Ficha Técnica de Campo, Punto 3, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| Ag | 30 | 30 | 3/4 | Arcillosa | 5 |
| C | 30 | 60 | 5/8 | Arcillosa | 5 |
| C | 30 | 90 | 5/8 | Arcillosa | 5 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 27 de noviembre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 24:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 3, masa saturada = 0,4230 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 12,2 |
| 30 | 12,6 |
| 45 | 12,1 |
| 60 | 12,8 |
| 75 | 12,5 |

La conductividad hidráulica se estabiliza entre 12,8 mL / 15 min y 12,5 mL / 15 min, cuyo rango es equivalente a [0,8333 ; 0,8533] mL/min.

El rango de la misma es una conductividad relativamente reducida pero, es una de las más altas obtenidas en los puntos muestreados. La misma concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: agricultura de café, con intercalado de una siembra de maíz. Es probable que este rango de infiltración se deba a que, como en el caso del punto 2, el suelo agrícola esté suelto por la acción del arado.

### 4.3.4 Punto 4: cilindro 4

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 25:** Ficha Técnica de Campo, Punto 4, Pendiente 30%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| B | 30 | 30 | 3/4 | Arcillosa | 10 |
| B | 30 | 60 | 2/2 | Arcillosa | 10 |
| B | 30 | 90 | 2/1 | Arcillosa | 20 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 27 de noviembre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 26:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 4, masa saturada = 0,4105 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 0,5 |
| 30 | 0,3 |
| 45 | 0,2 |
| 60 | 0,6 |
| 75 | 0,6 |

La conductividad hidráulica se estabiliza en 0,6 mL / 15 min, cuya equivalencia es de [0,04] mL/min.

El valor de la misma revela que se trata de una zona afectada por la compactación mecánica y concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: agricultura de café.

### 4.3.5 Punto 5: cilindro 5

Se utiliza una ficha técnica adaptada de las proveídas por el geógrafo Ph.D. Francisco Solano:

**Tabla 27:** Ficha Técnica de Campo, Punto 5, Pendiente 0%, no se evidencia presencia de horizontes A y 0

| ***Horizontes*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Símbolo*** | ***Espesor*** | ***Profundidad [cm]*** | ***Color*** | ***Textura*** | ***Consistencia [kg/cm$^2$]*** |
| C | 30 | 30 | 5/2 | Arcillosa | 10 |
| C | 30 | 60 | 5/2 | Arcillosa | 10 |
| C | 30 | 90 | 5/2 | Arcillosa | 20 |
| C | 30 | 120 | 5/2 | Arcillosa | 20 |

**Prueba de Conductividad Hidráulica**

Realizada el día 27 de noviembre de 2019, en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo la tutela del geógrafo PhD Francisco solano, a una temperatura de 30°C.

**Tabla 28:** Tabla de prueba de Conductividad Hidráulica, Punto 5, masa saturada = 0,5190 kg

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 15 | 0,5 |
| 30 | 0,5 |
| 45 | 0,5 |
| 60 | 0,5 |
| 75 | 0,5 |

La conductividad hidráulica se mantiene en 0,5 mL / 15 min, cuya equivalencia es de [0,033] mL/min.

El valor de la misma revela que se trata de una zona afectada por la compactación mecánica y concuerda con la actividad económica que se desarrolla sobre este suelo: pastura para ganado lechero de extensión.

### 4.3.6 Supervivencia semanal

| Prueba de supervivencia semanal, año 2019 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tarea** | **Setiembre** | | | | **Octubre** | | | | **Noviembre** | | | | **Diciembre** | | | |
| Punto 1 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 2 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 3 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 4 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Punto 5 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Sí | Sí | Sí | Sí |

### Prueba de presencia de humedad en el suelo

**Figura 33:** Prueba de presencia de humedad en el retenedor/colector de humedad de los regeneradores puntuales de horizontes A y 0

**Supervivencia Final**

La última visita para comprobar la supervivencia de los arbolitos plantados en setiembre fue durante el domingo 12 de enero de 2020, por la mañana.

1. **Punto 1: árboles de Níspero Zapotillo (Manilkara zapota)**

**Figura 34:** Prueba de Supervivencia final, punto 1

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto, visible en el captador/retenedor de humedad y se evidencia que los arbolitos de aguacatillo han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 2 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y 1 semanas iniciales de enero 2020.

2. **Punto 2: árboles de almendro de montaña (*Dipterix panamensis*).**

**Figura 35:** Prueba de Supervivencia final, punto 2

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto, visible en el captador/retenedor de humedad y se evidencia que los arbolitos de almendro de montaña han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 2 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y 1 semanas iniciales de enero 2020.

3. **Punto 3: árboles de Níspero Zapotillo (Manilkara zapota).**

**Figura 36:** Prueba de Supervivencia final, punto 3

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto, visible en el captador/retenedor de humedad y se evidencia que los arbolitos de zapotillo han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 2 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y 1 semanas iniciales de enero 2020.

4. **Punto 4: árboles de almendro de montaña (*Dipterix panamensis*).**

**Figura 37:** Prueba de Supervivencia final, punto 4

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto, visible en el captador/retenedor de humedad y se evidencia que los arbolitos de almendro de montaña han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 2 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y 1 semanas iniciales de enero 2020.

5. **Punto 5: árboles de cedro amargo (*Cedrela odorata L.*).**

**Figura 38:** Prueba de Supervivencia final, punto 1

Se comprueba que existe un contenido de humedad en el suelo sensible al tacto, visible en el captador/retenedor de humedad y se evidencia que los arbolitos de cedro amargo han generado suficiente crecimiento radicular para sobrevivir durante las últimas 2 semanas del monitoreo: semana final de diciembre 2019 y 1 semanas iniciales de enero 2020.

## 4.4 Resumen Comparativo

Para realizar un análisis comparativo de las condiciones de las pruebas de conductividad entre las dos microcuencas, se tabuló la información de los distintos puntos en las siguientes tablas:

**Tabla 29:** Tabla resumen de pruebas de Conductividad Hidráulica, 4 locaciones de la microcuenca de la quebrada Caracol, el 9 de setiembre de 2019

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Punto 1** | **Punto 2** | **Punto 3** | **Punto 4** |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 1,5 | 1,7 | 2,2 | 0 |
| 30 | 2,0 | 0,7 | 1,6 | 0 |
| 45 | 2,5 | 0,8 | 1,2 | 0 |
| 60 | 3 | 0,9 | 1 | 0 |
| 75 | 3,5 | 0,4 | 1 | 0 |
| **Estable [mL/min]** | [0,2 ; 0,233] | [0,06 ; 0,0267] | 0,0667 | 0 |

**Tabla 30:** Tabla resumen de pruebas de Conductividad Hidráulica, 5 locaciones de la microcuenca de la quebrada Trapiche, el 22 de noviembre de 2019

| **Tiempo [minutos]** | **Volumen de Conducción [mL]** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Punto 1** | **Punto 2** | **Punto 3** | **Punto 4** | **Punto 5** |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 1,4 | 4,3 | 12,2 | 0,5 | 0,5 |
| 30 | 1 | 4 | 12,6 | 0,3 | 0,5 |
| 45 | 0,3 | 4 | 12,1 | 0,2 | 0,5 |
| 60 | 0,1 | 4,7 | 12,8 | 0,6 | 0,5 |
| 75 | 0 | 4,3 | 12,5 | 0,6 | 0,5 |
| **Estable [mL/min]** | 0 | [0,06 ; 0,0267] | [0,8333 ; 0,8533] | 0,04 | 0,033 |

Al observas los datos de las tablas anteriores, se evidencia la existencia una extendida degradación de la capacidad de los suelos de las microcuencas respecto a su capacidad de conducir agua, por lo que, ante eventos extremos de precipitación, se podrían generar flujos de escorrentía extremos.

Lo anterior aumentaría el riesgo de inundación y avenidas en los cauces locales y generaría una posible afectación de la infraestructura en las fuentes de captación de la ASADA de Calle Zamora y la ASADA de San Rafael.

Lo que podría significar riesgos sanitarios en un futuro no muy distante.

# 5 Discusión de Resultados

Con respecto al cumplimiento de los objetivos del proyecto, se comenzará el análisis con una evaluación del término de los objetivos específicos:

**Objetivos Específicos**

- Analizar la pertinencia de los principios de manejo del suelo llevados a cabo en la zona alta de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, para determinar sus efecto sobre este recurso y la recarga hídrica.

Este punto fue medular para el desarrollo del presente proyecto, porque le daba una razón de ser al mismo.

Según se pudo constatar durante las visitas al campo, en la zona de estudio de la quebrada Caracol y la quebrada Trapiche, no se aplicaba ningún método para el manejo del suelo.

En las llanas palabras de los propietarios de los terrenos de las microcuencas, el suelo donde desarrollan sus actividades agropecuarias es sólo “tierra”.

Entonces, se constató la necesidad de difundir conceptos básicos sobre estructura, composición, compactación y sobre la importancia de la conservación de las tres estructuras fundamentales de los suelo (física, química y biológica) para que las actividades agropecuarias fueran sostenibles a lo largo del tiempo y que las mejoras en manejo y gestión del recurso suelo podrían significar ahorros importantes en agroquímicos.

Asimismo, se encontró que es muy importante entablar un proceso de gestión integral del recurso suelo y el recurso agua en las microcuencas en cuestión, con el fin de que la técnica probada en campo del regenerador puntual de horizontes A y 0 sea aplicada, seguida y acompañada por los actores locales, como lo son: la ASADA de Calle Zamora, la ASADA de San Rafael, los agricultores y propietarios de terrenos.

- Describir el método empírico utilizado por Yacouba Sawadogo para luchar contra la desertificación en Burkina Faso, con el fin de contar con una base técnica comprobable de los principios de manejo y sus efectos en el suelo, de donde partir para el diseño.

Con respecto a este objetivo, fue posible recopilar la información técnica, espacial y pormenores culturales con respecto al método empírico llevado a la práctica por Yaucouba Sawadogo en su país, para luchar contra la desertificación y demás características de interés para el presente proyecto. Y se halló que era necesario adaptarlo a condiciones climáticas húmedas y de fuertes pendientes.

- Determinar las etapas del ciclo hidrológico en que se espera intervenir con la técnica a diseñar, con el fin de delimitar el campo de acción de la misma y definir las variables de control a tomar en cuenta.

Después de un análisis técnico, se determinó que las etapas del ciclo hidrológico en las que se desea intervenir son:

a) *Precipitación*: por medio del colector de humedad/precipitación de los regeneradores puntuales de horizontes Ay 0.
b) *Escorrentía e infiltración*: por medio del foso excavado que contiene la dona de material biodegradable y el horizonte A artificial. Esto al detener los flujos superficiales y favorecer la infiltración

- Determinar las condiciones locales del suelo, clima y zona de vida original de la microcuenca para recolectar y reproducir los microrganismos eficientes locales y utilizarlos en el regenerador puntual de horizontes A y O, como aceleradores del proceso de pedogénesis.

En este punto, se determinó que la zona de vida, clima y suelo del lugar corresponden con:

a) *Zona de vida*: Bosque muy Húmedo Premontano.
b) *Clima*: Tropical muy Húmedo.
c) *Suelo*: según se constató en campo, los suelos varían entre entisoles y ultisoles. De intensivo uso agrícola y alta compactación.

- Definir las especies vegetales a utilizar en las pruebas del regenerador puntual de horizontes y sus requerimientos biológicos de humedad, dependientes del tipo de zona de vida original.

Por sus características biológicas, se decidió utilizar las siguientes especies:

a) Cedro Amargo (Cedrela odorata L.).
b) Cenízaro (Samamea saman).
c) Sotacaballo (Zygia longifolia.
d) Níspero Zapotillo (Manilara zapota).
e) Almendro de montaña (Dipterix panamensis).

Según fue posible recolectar información de estas especies, se determinó su idoneidad para las pruebas, con el fin de no afectar los ecosistemas de la zona de vida de Bosque muy Húmedo Premontano.
No obstante, cabe señalar que para el caso de la del Almendro de Montaña, no debió de ser considerada, pues su hábitat corresponde con otro margen de altitud sobre el nivel del mar,

pero, era el deseo manifiesto de los propietarios de los terrenos de las microcuencas que se utilizara.
Por lo anterior se considera muy importante seguir los criterios de selección de especies según su hábitat y entablar mesas para la concertación con los actores locales sobre la importancia ecosistémica y económica de no utilizar especies vegetales exógenas a las zonas de vida locales.
Puesto que, esto pudo haber afectado los resultados de la evaluación del regenerador puntual de horizontes A y 0 de haber muerto los arbolitos por falta de humedad o por una temperatura menos para su desarrollo.

Sin embargo, para el presente caso, se comprobó que éstos pudieron sobrevivir e incluso crecer, lo que puede revelar algo adicional a éste proyecto: en la zona en estudio los regímenes de temperatura y precipitación están cambiando y permitiendo el ingreso de especies invasoras desde pisos altitudinales distintos.

- Realizar los cálculos termodinámicos necesarios para determinar una metodología para evaluar la eficacia de la membrana colectora de precipitación del regenerador.

Para este punto, se recabó la información pertinente en la sección 2.5 y la sección 3.5.5 para la determinación de la humedad relativa contenida en el aire entre la membrana colectora/retenedora de humedad del regenerador puntual de horizontes A y 0, ante el fallo de los sensores remotos de humedad del modelo “Soil Humidity Sensor (Hygrometer)”.

Dado que dichos sensores no pudieron cumplir con las expectativas en campo, a la hora de poner a prueba su resistencia física y versatilidad.

Finalmente, con respecto al objetivo general del presente trabajo:

**General**

- Diseñar y probar una técnica para regeneración puntual de los horizontes A y O de los suelos, para las zonas altas de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, en San Ramón, Costa Rica, con el fin de contribuir con mejorar la disponibilidad de agua en los acuíferos locales, para la posterior gestión integral de la misma.

Se puede afirmar, a partir de las pruebas en campo realizadas:

a) Infiltración en suelos.
b) Supervivencia de los árboles.
c) Sensación y visualización de humedad en el suelo.

Que fue posible diseñar y probar la técnica del regenerador puntual de horizontes A y 0, adaptada a las condiciones biogeográficas de las microcuencas de las quebradas Caracol y Trapiche.

Asimismo, se comprueba que en los suelos locales de dichas microcuencas se requiere de metodologías como la diseñada, acompañadas con un plan de gestión integral del recurso suelo, con el fin de contar con suficiente recurso agua que gestionar, en un futuro no tan lejano.

Esto, debido a que ya se muestran los efectos del calentamiento global y el cambio climático al constatar la presencia de especies invasoras de otras zonas de vida.

Por parte del método de regeneración puntual de horizontes A y 0, se realizó una comparación entre 2 grupos de puntos de muestreo:

- *Microcuenca Caracol*: para los 4 puntos muestreados (2 con doble regenerador), se comprobó que la técnica del regenerador podría omitir la incorporación del colector/retenedor de humedad, pues el inicio de las pruebas se realizó durante las estación lluviosa de la zona. Sin embargo, durante la última toma de datos, se comprobó que el nivel de humedad presente en el suelo era reducido. Por lo que se recomienda el uso del colector/retenedor de humedad desde un inicio.
- *Microcuenca Trapiche*: para los 5 puntos muestreados (con doble regenerador), se comprobó que el colector/retenedor de humedad es efectivo y no produce un efecto invernadero dañino para los arbolitos, ni pudrición de raíces.

# 6 Conclusiones

Luego del análisis realizado, se llega a las siguientes conclusiones:

- Se analizó la pertinencia de los principios de manejo del suelo llevados a cabo en la zona alta de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, para determinar sus efectos sobre este recurso y la recarga hídrica y, según se pudo constatar durante las visitas al campo, en la zona de estudio de la quebrada Caracol y la quebrada Trapiche, no se aplicaba ningún método para el manejo del suelo.
- Se alcanzó a describir el método empírico utilizado por Yacouba Sawadogo para luchar contra la desertificación en Burkina Faso, con el fin de contar con una base técnica comprobable de los principios de manejo y sus efectos en el suelo, de donde partir para el diseño. Y se halló que era necesario adaptarlo a condiciones climáticas húmedas y de fuertes pendientes.
- Se determinó las etapas del ciclo hidrológico en que se espera intervenir con la técnica a diseñar, con el fin de delimitar el campo de acción de la misma y definir las variables de control a tomar en cuenta: la precipitación, la escorrentía, la infiltración y evapotransporación.
- Se determinó las condiciones locales del suelo, clima y zona de vida original de la microcuenca para recolectar y reproducir los microrganismos eficientes locales y utilizarlos en el regenerador puntual de horizontes A y O, como aceleradores del proceso de pedogénesis. En concreto, la zona incluía ultisoles, inceptisoles y suelos agrícolas altamente compactados, en una zona de vida de bosque muy húmedo premontano, con temperaturas medias entre 18°C y 24°C, y precipitaciones promedio anuales que van de los 2000 a los 4000 mm.
- Se definió las especies vegetales a utilizar en las pruebas del regenerador puntual de horizontes y sus requerimientos biológicos de humedad, dependientes del tipo de zona de vida original: Cedro Amargo, Cenízaro, Sotacaballo y Níspero Zapotillo, con la selección forzada del Almendro de Montaña, por petición explícita de los actores locales.
- Se realizó los cálculos termodinámicos necesarios para determinar una metodología para evaluar la eficacia de la membrana colectora de precipitación del regenerador, por medio del cálculo de la humedad relativa del aire cercano al suelo.

Y muy importante:

- Se logró diseñar y probar una técnica para regeneración puntual de los horizontes A y O de los suelos, para las zonas altas de la microcuenca de las quebradas Caracol y Trapiche, en San Ramón, Costa Rica, con el fin de contribuir con mejorar la disponibilidad de agua en los acuíferos locales, para la posterior gestión integral de la misma. La cual, además, es económica y puede aumentar las probabilidades de

supervivencia de los árboles en proyectos de reforestación, basados en la Tabla de Costos del Anexo 9.4.

# 7 Recomendaciones

Luego del análisis y experiencias en campo, se recomienda:

- Organizar una mesa de concertación con los actores locales de las microcuencas para:
    - Acordar la pertinencia de un proceso de Gestión Integral de los Recursos Agua y Suelo.
    - Acordar las mejores pautas para la selección adaptativa de especies de árboles para la reforestación y aplicación de la técnica de regeneración puntual de horizontes A y 0, junto con otras complementarias y pertinentes.
    - Determinar y negociar las fuentes financiamiento para la compra de materiales para los regeneradores puntuales de horizontes A y 0.
    - Organizar acciones para sentar responsabilidades para la aplicación técnica y establecer canales de comunicación transparentes para el monitoreo de la misma.
- Buscar apoyo de instituciones como el Ministerio de Agricultura, Acueductos y Alcantarillados y ONG como Costa Rica para Siempre, para contar con asesoría y fuentes de financiamiento alternativa.
- Buscar una manera más robusta y práctica para censar la humedad en los suelos locales y su infiltración.
- Con base en la Tabla de Costos del Anexo 9.4, es recomendable generar los costos estimados de una hectárea a reforestar por medio de la técnica del regenerador puntual de horizontes A y 0.

# 8 Bibliografía


Alves-Milho, S. R. F. (2018). *Potencial de mejoramiento genético en Dipteryx panamensis Pittier (FABACEAE)*. Trabajo Final de Graduación realizado para optar por el título de Magister Scientiae en Ciencias Forestales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Consultado el 11/01/2020, a las 6:7pm. Disponible en:

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9882/potencial_mejoramiento_genetico_dipteryx_panamensis_pittier.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Alduchov O.A. y Eskridge R.E. (1994). *Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure*. National Climatic Data Center. National Ocean Administration. Asheville, United States of America. Consultado el 11/1/2020, a las 4:00am. Disponible en:

http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/548871-PjpxAP/webviewable/548871.pdf (U.S. Department of Energy, Office of Scientific & Technical Information)

Bauer, W. y Westfall, G. D. (2011). *Física: para ingeniería y ciencias*. Volumen 1. McGraw-Hill. China.

**Birkel, Ch. (2018). *Curso de Hidrología para Manejo de Cuencas: Unidad 2*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.**

**Birkel, Ch. (2018). *Curso de Hidrología para Manejo de Cuencas: Unidad 3*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.**

Birkel, Ch. (I semestre 2013). *La atmosfera: estructura, composición y sistema térmico*. Curso: GF0205-Climatología. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica.

Birkel, Ch. (I semestre 2013). *Humedad*. Curso: GF0205-Climatología. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica.

Birkel, Ch. (I semestre 2013). *Fundamentos del Clima I*. Curso: GF0205-Climatología. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica.

Bitácoras (2014). *La increíble historia de Yacouba Sawadogo, el hombre que detuvo el avance del desierto*. Diario digital ABC. España. Consultado el 11/08/2019 a las 8:34am. Disponible en:

https://www.abc.es/tecnologia/redes/20140730/abci-hombre-detuvo-avance-desierto-201407301302.html

Çengel, Y. A. y Cimbala, J.M. (2012). Mecánica de Fluidos (Segunda Edición). McGraw Hill. México DF. México.

Çengel, Y. A. y Boles M. (2003). Termodinámica (Cuarta Edición). McGraw Hill. México DF. México. Págs 647-672.

Centro Centroamericano de Población (2019). *Censos Nacionales de Población y Vivienda de Costa Rica 2011*. Universidad de Costa Rica. Consultado el 12/08/2019 a las 3:20am. Disponible en:

https://censos.ccp.ucr.ac.cr/index.php/censos_c?censo=crproydi

Centro Centroamericano de Población (2019). *Proyecciones Distritales de Población de Costa Rica 2000-2050 del INEC*. Universidad de Costa Rica. Consultado el 11/08/2019 a las 2:30am. Disponible en:

https://censos.ccp.ucr.ac.cr/index.php/censos_c?censo=crproydi

Centro Científico Tropical (CCT) / Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (2004). *Zonasvida2008crtm05*. Base de datos Atlas 2014. ITECR.

Centro Científico Tropical, CIEDES, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (1998). *Cober2005crtm05*. Base de datos Atlas 2014. ITECR.

Crbio (2020). *Samanea saman*. Instituto Nacional de la Biodiversidad de Costa Rica. Consultado el 1/01/2020 a las 5:50pm. Disponible en:

http://www.crbio.cr:8080/neoportal-web/species/Samanea%20saman

Fernández-Cascante, O. (2014). *Generador de agua atmosférica, un caso particular: propuesta de método de predicción de masa condensada e índice de aprovechamiento energético*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology (Fourth Edition)*. Prentice Hall. New Jersey. United States of America. Pág 32.

David R. Lide, ed. (Digital Version 2009). *CRC Handbook of Chemistry and Physics (89th Edition)*, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.

Hernández, C. y Cabalceta G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. Escuela de Fitotecnia, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Herrera, W. (2012). *Uso de tecnología de Biofermentos*. Entrevista radial, programa El Agropecuario, Radio Columbia, Costa Rica. Viernes 28 de setiembre y lunes 1 de octubre de 2012. Consultado el 16/8/2019, disponible en:

https://miguelgrillo.blogspot.com/search?q=microorganismos

Hertsgaard, M. (2009). *Regreening Africa*. The Nation, digital newspaper. Consultado el 13/08/2019 a las 7:52am. Disponible en:

https://www.thenation.com/article/regreening-africa/

Instituto de Geografía. *Principios de hidrogeografía*. Serie Textos Universitarios, Núm. 1. Universidad Autónoma de México (11/1/2020, 5:00pm) Disponible en:

http://www.igeograf.unam.mx/web/sigg/docs/pdfs/publicaciones/geo_sigloxxi/serie_tex_uni/1/cp3.pdf

Japan Meteorological Agency. *Measurement of Humidity*. Chapter 3. (Consultado: 11/1/2020, 4:45pm) Disponible en:

http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ric/material/1_Lecture_Notes/CP3-Humidity.pdf

©JAXA/METI ALOS PALSAR (2011). *ALPSRP264770180-RTC_HI_RES*. Descargado el 9/08/2019 a las 2:00pm. Accedido por medio del sitio: https://search.asf.alaska.edu

Jordán, A. (2006). *Manual de Edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla, España.

Kaboré, D. y Reij, C. (2004). *The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso*. International Food Policy Research Institute (IFPRI). Consultado el 13/08/2019 a las 8:01am. Disponible en:

http://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/59638/filename/59639.pdf

Montoya, J. C. (2012). *¿Cómo hacer Micro-organismos eficientes?*. Dirección Regional Central Occidental. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. Consultado el 13/08/2019 a las 10:15am. Disponible en:

https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/drocc-hoja-04-2012.pdf

Mundo Forestal (2020). *Cedro Amargo*. San José, Costa Rica. Consultado el 1/01/2020 a las 5:41pm. Disponible en:

http://www.elmundoforestal.com/detalles/Cedro%20amargo

Mundo Forestal (2020). *Níspero Zapotillo*. San José, Costa Rica. Consultado el 1/01/2020 a las 6:23pm. Disponible en:

http://www.elmundoforestal.com/detalles/N%C3%ADspero%20zapotillo

Mundo Forestal (2020). *Sotacaballo*. San José, Costa Rica. Consultado el 1/01/2020 a las 6:06pm. Disponible en:

http://www.elmundoforestal.com/detalles/Sotacaballo

Schaetzl, R. J. (2005). *Soils genesis and geomorphology*. Cambridge University Press. United Kingdom.

SINAC (2019). *Área de Conservación Central (ACC)*. Gobierno de Costa Rica. Consultado el 12/08/2019 a las 7:45pm. Disponible en:

http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/Paginas/default.aspx

SINIGIRH (2019). *ASADAS*. Gobierno de Costa Rica. Consultado el 11/8/2019 a las 3:49am. Disponible en:

http://www.da.go.cr/asadas/

U.S. Geological Survey, Dirección General de Geología y Minas e Hidrocarburos, Universidad de Costa Rica (1987). *Geologíacrtm05*. Base de datos Atlas 2014. ITECR.

**Walter, W. (2010). *Curso. Planificación del uso de la tierra: Unidad 2*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.**

Zinck, J.A. (2012). *Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos* naturales. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, ITC. Enschede, The Netherlands.

# 9 Anexos

## 9.1 Cronograma Inicial

| Cronograma 2019 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tarea** | **Setiembre** | | | | **Octubre** | | | | **Noviembre** | | | | **Diciembre** | | | |
| Elaboración del proyecto de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del proyecto de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Levantamiento de información | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Procesamiento de información | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Análisis de la información | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración de resultados | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración del borrador de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisión asesor y coordinación | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Incorporación de correcciones | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración de documento final | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del proyecto (asesor/coordinación) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Presentación del trabajo final por el aula virtual | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del documento | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reproducción y distribución del documento de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | |

## 9.2 Cronograma Final

| Cronograma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2019 | | | | | | | | | | | | | | | | 2020 | | | | | | | |
| Tarea | Setiembre | | | | Octubre | | | | Enero | | | | Diciembre | | | | Enero | | | | Febrero | | | |
| Elaboración del proyecto de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del proyecto de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Levantamiento de información | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Procesamiento de información | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Análisis de la información | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración de resultados | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración del borrador de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisión asesor y coordinación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Incorporación de correcciones | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración de documento final | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del proyecto (asesor/coordinación) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Presentación del trabajo final por el aula virtual | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aprobación del documento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reproducción y distribución del documento de tesis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

## 9.3 **Reporte de Resultados de Ensayo:** Preparado de Microorganismos Eficientes

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

CIA Centro de Investigaciones Agronómicas

**Reporte de Resultados de Ensayo**

**Número de Solicitud:** 72850 **Fecha de emisión del reporte:** 06/12/19

**Información del Usuario:**

Nombre: OSVALDO FRANCISCO FERNANDEZ CASCANTE
Subcliente: --
Dirección: San Ramón, Alajuela.
Contacto: Osvaldo Fernández Cascante.
Teléfono: 8875-7146

**Resultados del ensayo**

| ID. Lab. | ID. Cliente | Identificación de Bacterias Dominantes |
|---|---|---|
| MI-495-19 | PREPARADO DE MICROORGANISMOS EFICIENTES DEL BOSQUE | *Bacillus megaterium* |

| ID. Lab. | ID. Cliente | Identificación de Hongos Dominantes |
|---|---|---|
| MI-495-19 | PREPARADO DE MICROORGANISMOS EFICIENTES DEL BOSQUE | Negativo |

Dra. Lidieth Uribe Lorío
M.Q.C. cod 664
Coordinadora
Laboratorio de Microbiología Agrícola

cia

Teléfono: (506) 2511-2070 Fax: (506) 2234-1627 Correo electrónico: cia@ucr.ac.cr
Página web: www.cia.ucr.ac.cr

## 9.4 Tabla de Costos de Materiales

| Material | Costo | Regenerador puntual de horizontes A y 0 |
|---|---|---|
| Plástico transparente doble ancho rollo 1.8 metros (abre a 3,6 metros)[1] | 1100 colones/metro | 78,57 colones por cubierta retenedora de humedad |
| Tela de manta cruda 1,5 metros de ancho[2, 3] | 2500 colones/metro | 1000 colones por dos tapas de 50 $cm^2$ |
| Abono orgánico | Sin costo, por poseer compostera. | 0 |
| Preparado de microorganismos eficientes | Sin costo, por tener acceso al material biológico de los bosques nativos. | 0 |
| Enmiendas orgánicas | Sin costo, por tener acceso al material biológico de los bosques nativos. | 0 |
| Árboles nativos | Sin costo, por tener vivero propio. | 0 |
| **Total** | | 1078,57 colones[4, 5] |
| **Equivalencia en USD** | | 1,90 USD |

[1] Precio consultado en *Construplaza*, Costa Rica.

[2] Precio consultado en *Metrokilos Palmares*, Costa Rica.

[3] Puede sustituirse con cualquier tela orgánica que sea resistente para contener la masa de horizonte A artificial.

[4] Al tipo de cambio de venta del dólar estadounidense de 565.94 colones/USD, al 31 de enero de 2020. Fuente: Banco Central de Costa Rica.

[5] Se recomienda sustituir por tela de Yute de sacos de desecho de jardinería, lo que bajaría el costo a 78,57 colones (14 centavos de USD).