

Patrones de infiltración de agua en suelos de uso forestal, pecuario y agrícola en Málaga

Santander

Lady Vanessa Hernández Saldaña y Diego Alirio Meneses Padilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Forestal

Director

Ricardo Andrés Oviedo Celis

MSc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Codirector

Mauricio Andrés Ruiz Ochoa

PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED)

Ingeniería Forestal

Málaga

2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres Maricela Saldaña Vera y Pedro Julio Hernández Marroquín por todo su apoyo, motivación, paciencia y esfuerzo para formarme como persona y profesional.

A mis abuelos Adolfina Vera Rojas y Gonzalo Saldaña quien me guía desde el cielo, a mi hermano Keiner, a la familia Saldaña, a Carlos Bejarano, a mis amigos que hicieron parte de este proceso en mi vida.

Lady Vanessa Hernández Saldaña

Dedico el presente proyecto a mis padres, Alirio Meneses y Fidelia Padilla, por el gran esfuerzo que han realizado para ayudarme a culminar esta carrera profesional y por su apoyo incondicional, que ha sido la motivación para llegar hasta este momento de la vida.

A mis hermanos y amigos que han prestado de su compañía y ayuda durante este proceso de formación.

Diego Alirio Meneses Padilla

Agradecimientos

A Dios por brindarnos la vida y la sabiduría para desarrollar este trabajo y culminar nuestra carrera.

A nuestros padres y hermanos por su sacrificio y constante apoyo durante nuestra formación académica.

A nuestro director MSc. Ricardo Oviedo Celis por asesorarnos y compartir con nosotros sus amplios conocimientos, además le agradecemos por permitir que su finca fuera uno de los escenarios para la toma de datos.

A nuestro codirector PhD Mauricio Andrés Ruiz Ochoa, por el tiempo dedicado y cada una de sus observaciones y correcciones en nuestro trabajo.

A los propietarios de las fincas donde se tomaron los datos y muestras, por abrirnos las puertas de sus predios y permitir que realizáramos cada una de las actividades planteadas para el desarrollo de nuestro trabajo.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos diferentes espacios como laboratorios para el desarrollo de nuestro trabajo, y por ser la parte fundamental de nuestra formación académica y brindarnos una educación de calidad.

Vanessa Hernández y Diego Meneses

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Recurso suelo	14
2.1.1 Funciones del suelo.....	14
2.1.2 Servicios ecosistémicos que ofrecen los suelos	15
2.2 Ciclo hidrológico	16
2.2.1 Infiltración.....	17
2.3 Bosque de roble.....	17
2.4 Plantación forestal.....	18
2.5 Sistema agroforestal.....	18
2.6 Pastizales.....	19
3. Metodología	20
3.1 Área de estudio	20
3.1.1 Muestreo y toma de información primaria.....	21
3.1.2 Muestreo florístico de usos	21
3.1.3 Muestreo de infiltración.....	21
3.1.4 Muestreo de suelo	22

3.2 Modelo de infiltración.....	22
3.2.1 Modelo Kostiakov.....	23
3.2.2 Infiltración acumulada	24
3.3.3 Infiltración básica.....	24
3.3 Patrones de infiltración	25
3.3.1 Análisis de datos	25
4. Resultados	26
4.1 Caracterización florística de cada uso de suelo	26
4.2 Identificación de las propiedades física del suelo en cada uso establecido	29
4.2.1 Caracterización climática zona de estudio.....	33
4.3 Capacidad de infiltración para cada uso del suelo	34
4.3.1 Velocidad de infiltración.....	34
4.3.2 Infiltración acumulada	35
4.3.3 Infiltración básica del suelo	36
4.4 Patrones de infiltración para los usos de suelo definidos	37
5. Discusión.....	40
6. Conclusiones	41
7. Recomendaciones	44
Referencias Bibliográficas	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Propiedades físicas del suelo analizadas</i>	22
Tabla 2 <i>Valor promedio y desviación estándar parámetros físicos del suelo por uso</i>	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Mapa de ubicación, área de estudio</i>	20
Figura 2 <i>Diseño muestreo parámetros edáficos</i>	23
Figura 3 <i>Perfil de vegetación (A)</i>	27
Figura 4 <i>Perfil de vegetación (B)</i>	28
Figura 5 <i>Clasificación textural usos del suelo</i>	30
Figura 6 <i>Comparación de medias para densidad aparente y real por uso del suelo</i>	31
Figura 7 <i>Comparación de medias para porosidad total y humedad por uso del suelo</i>	31
Figura 8 <i>Comparación de medias para temperatura y potencial mátrico por uso del suelo</i>	32
Figura 9 <i>Distribución de precipitación y temperatura municipio de Málaga periodo 2019 - 2023</i>	33
Figura 10 <i>Velocidad de infiltración para cuatro usos</i>	35
Figura 11 <i>Infiltración acumulada para cuatro usos</i>	36
Figura 12 <i>ANOVA de un factor y prueba de Tukey para infiltración básica</i>	37
Figura 13 <i>Correlograma de infiltración básica bosque y plantación forestal con variables edáficas Málaga – Santander</i>	38
Figura 14 <i>Correlograma de infiltración básica sistema agroforestal con pastos, variables edáficas Málaga – Santander</i>	39

Glosario

Composición florística: es la biodiversidad que se encuentra en un lugar determinado, enumera familias, géneros y especies presentes en un inventario forestal.

Infiltración acumulada: el volumen acumulado de agua infiltrada dentro de un periodo de tiempo.

Infiltración básica: velocidad de infiltración cuando se hace constante respecto del tiempo.

Potencial mátrico: fuerza de absorción y capilaridad, que atraen y retienen el agua en el suelo reduciendo la energía potencial.

Propiedades físicas del suelo: son las propiedades del suelo que determinan la rigidez y la fuerza de sostenimiento del suelo. También, la disponibilidad de oxígeno, movimiento del agua, retención de nutrientes y almacenamiento de agua.

Sensor GS3: permite medir el contenido de humedad y temperatura del suelo.

Suelos Andisoles: es un suelo de origen volcánico, de color negro y se encuentra en zonas montañosas.

Tasa de infiltración: es la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de la superficie.

Tensiómetro IRROMETER: es un instrumento que mide la tensión del agua, es decir, el esfuerzo de las raíces para extraer agua del suelo.

Uso del suelo: se refiere a la destinación asignada que se le da al suelo por medio del plan de ordenamiento territorial, se puede clasificar en rural o urbano, representa capacidad agrologica y actividades que se puedan desarrollar sobre el mismo.

Resumen

Título: Patrones de infiltración de agua en suelos de uso forestal, pecuario y agrícola en Málaga Santander*

Autor: Lady Vanessa Hernández Saldaña y Diego Alirio Meneses Padilla **

Palabras Clave: Agua del suelo, Gestión de agua, Ecosistemas altoandinos, Subsuelo.

Descripción: Los procesos en la interfaz suelo, planta, atmósfera son fundamentales para la estabilidad y conservación hídrica. El presente estudio trata sobre patrones de infiltración en bosque natural, plantación forestal, sistema agroforestal y pastos, característicos de la ruralidad del municipio de Málaga al Nororiente de Santander - Colombia. Se busca portar información que explique el proceso de infiltración desde la implementación de actividades productivas y de conservación al suelo, para lo cual, se tomaron en campo muestras de propiedades físicas del suelo a 30 cm de profundidad. Se determinó la composición y estructura de cada cobertura vegetal, y la infiltración se obtuvo por el método de doble anillo, empleando el modelo de Kostiakov, datos que fueron sometidos a pruebas de ANOVA y Tukey ($p < 0,05$). Los resultados muestran estructura y composición diferente de la flora en los cuatro usos del suelo, donde la plantación forestal y bosque fueron los de mayor complejidad. La densidad aparente, porosidad total, y humedad variaron en cada uso. Respecto de la infiltración, el bosque y la plantación presentaron valores similares en velocidad y acumulación de agua en el suelo, contrario del sistema agroforestal y pastos. Sobre el patrón de infiltración básica, se identificó influencia de la densidad aparente, porosidad total y humedad. Se concluye, que la cobertura vegetal y algunas propiedades físicas del suelo influyen en la regulación del agua en su paso de la atmósfera al subsuelo, en tal sentido, se destaca la función del árbol natural y plantado en la gestión integral del recurso hídrico de la ruralidad en el municipio, que debe ser abordado y conocido por las comunidades, a fin de implementar acciones en los usos productivos donde la modificación del suelo puede traer alteraciones al ciclo hidrológico que afecten la disponibilidad y calidad del agua.

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ricardo Andrés Oviedo Celis. MSc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Codirector: Mauricio Andrés Ruiz Ochoa. PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulicos.

Abstract

Title: Patterns of water infiltration in soils for forestry, pasture land and agricultural use in Málaga Santander *

Author(s): Lady Vanessa Hernández Saldaña y Diego Alirio Meneses Padilla **

Key Words: Soil water, Water management, High Andean Ecosystems, Subsoil.

Description: The processes at the soil, plant, atmosphere interface are fundamental for water stability and conservation. This study deals with infiltration patterns in natural forest, forest plantation, agroforestry system and pastures, characteristic of the rurality of the municipality of Malaga in the Northeast of Santander - Colombia. The aim is to provide information that explains the infiltration process from the implementation of productive and conservation activities to the soil, for which, samples of physical properties of the soil were taken in the field at 30 cm depth. The composition and structure of each vegetation cover was determined, and infiltration was obtained by the double ring method, using the Kostiakov model, data that were subjected to ANOVA and Tukey tests ($p < 0,05$). The results show different structure and composition of the flora in the four land uses, where the forest plantation and forest were the most complex. Bulk density, total porosity, and moisture varied in each use. Regarding infiltration, the forest and the plantation presented similar values in velocity and accumulation of water in the soil, contrary to the agroforestry system and pasture. Regarding the basic infiltration pattern, the influence of bulk density, total porosity and humidity was identified. It is concluded that the vegetation cover and some physical properties of the soil influence the regulation of water in its passage from the atmosphere to the subsoil, and that the water infiltration rate was similar in the agroforestry system and in the pasture.

* Degree Work

**Institute of Regional Projection and Distance Education. Forest Engineering Program Director: Ricardo Andrés Oviedo Celis. MSc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Codirector: Mauricio Andrés Ruiz Ochoa. PhD en Ingeniería - Recursos Hidráulico

Introducción

Las actividades humanas y el cambio climático que éstas generan, inciden en la degradación del suelo y alteración de sus componentes físicos, químicos y biológicos (Paricahua, 2021). Sin embargo, Carpio & Taype (2021) identifican las actividades de enfoque agropecuario y otras de índole comercial como agentes de mayor impacto en el funcionamiento del recurso suelo, que han causado su desgaste nutricional, compactación y desertificación. Este autor, también identifica la mala planificación territorial, como aspecto que limita el uso sostenible del suelo. Situación, que trae implicaciones no favorables en el suelo, para procesos como los desarrollados entre la interfaz líquida, sólida y biológica que lo conforma.

La diversidad de suelos en Colombia, se materializa en 12 órdenes taxonómicos que reflejan la diversidad del recurso natural (Lince & Sadeghian, 2021). De acuerdo con IGAC (2021), la mayoría de estos suelos tienen alta capacidad para la productividad agrícola, forestal y pecuaria. Sin embargo, reportes del DANE (2018) indican que estos usos pueden generar disparidad respecto de su real potencial, un aspecto que agudiza el actual contexto de afectación del suelo. Por lo tanto, los usos agrícolas, forestal comercial y pecuario, implican en ocasiones modificaciones a diferente escala de sus propiedades físicas, químicas y biológicas que deben ser objeto de estudio desde diferentes enfoques de las cuencas ambientales, forestales y del suelo (Leyva et al., 2018). Al respecto, Yaguache (2022) reporta como estas actividades impactan las relaciones hídricas del suelo, donde la escasa complejidad estructural de la cobertura natural en la superficie, es la principal causa para un desbalance hídrico. En este sentido, las relaciones hídricas del suelo son un proceso altamente afectado por el tipo de vegetación y los usos en estas en el tiempo, aspecto que López (2022) trata desde el ingreso y movimiento como procesos centrales del agua en el suelo.

Por su parte, la infiltración es un proceso importante dentro del ciclo hidrológico, que permite el ingreso y disponibilidad de agua en el suelo, un aspecto fundamental en la relación suelo - planta (Estrada et al., 2021). Este proceso, inicia con el aporte de agua de precipitación, que según la cobertura puede presentar fases previas en donde el ingreso se da en forma progresiva (Huaman, 2016). Sin embargo, usos de alta transformación en el suelo, generan aumento de escurrimiento superficial y disminución de la infiltración natural (Zhao et al., 2013). Además, los suelos donde se presentan condiciones de déficit hídrico tienen dificultades para desarrollar funciones intrínsecas, como el ciclaje de nutrientes, regulación del ciclo hídrico y supervivencia de organismos vivos, situación que compromete la capacidad para soportar las plantas y otras funciones como las mecánicas que conduce a la inestabilidad de los demás componentes del sistema (Luna et al., 2012).

El municipio de Málaga Santander, se caracteriza por una matriz de paisaje fragmentado por actividades rurales productivas. Esta localidad al nororiente del país presenta diferentes coberturas como bosques de roble afectados por la expansión agrícola y pecuaria. También, pastos con una mayor extensión, y algunas áreas en plantaciones forestales y sistemas agroforestales, coberturas que no han sido estudiadas para conocer y comprender su incidencia en los patrones de infiltración. Por tal motivo, es importante abordar este enfoque de la infiltración, acudiendo a las condiciones biofísicas y las especies presentes en suelos forestales, pecuarios y agrícolas. Por ende, este estudio se convierte en un espacio para generar nuevas informaciones desde la Ingeniería Forestal, que contribuya a la gestión del suelo y gestión hídrica en los municipios de la Provincia de García Rovira, Santander.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar patrones de infiltración en suelos con uso forestal, pecuario y agrícola, para el establecimiento de condiciones de regulación y disponibilidad del recurso hídrico del suelo en Málaga Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Describir la composición florística de cada uso del suelo como actividades productivas o de conservación.

Identificar las propiedades físicas del suelo en cada uso establecido.

Calcular la capacidad de infiltración para suelos forestales, pecuarios y agrícolas.

Explicar los patrones de infiltración para los usos definidos, a partir de la física del suelo.

2. Marco Teórico

2.1 Recurso suelo

De acuerdo con Bouma (2012), el recurso suelo es un sistema dinámico multifuncional, con factores bióticos y abióticos sobre un material parental, que cumple múltiples funciones con la capacidad de ofertar bienes y servicios para la supervivencia humana y las relaciones sociales. La formación del suelo depende de factores físicos, químicos y biológicos como el clima, organismos vivos, tiempo, relieve y roca madre. Lo ideal es que contenga 45% de minerales provenientes de la roca (arenas, limos y arcillas), aire 25%, agua 25% y materia orgánica 5% que resulta de la descomposición de restos vegetales, animales y microbianos (Montaño et al., 2018). En su evolución se diferencian los horizontes del perfil del suelo, lo que permite estudiar los procesos de formación sufridos durante su evolución. También, constituye un elemento clave en el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos superficiales y le confiere la capacidad para desarrollar funciones esenciales en su naturaleza medioambiental, ecológica, económica, social y cultural (Roque, 2015).

El suelo es un componente importante del medio ambiente del que depende la vida, su recuperación es compleja y tarda miles de años en formarse, su extensión es limitada, por lo que se considera un recurso natural no renovable (Arroyave & Restrepo, 2009). El suelo es una capa de mezcla rica en minerales, materia orgánica, gases, agua y nutrientes que forma un sustrato fértil para formar y mantener organismos vivos. Además, puede absorber, almacenar, transportar agua y solutos que sirven como reservorio, intercambio de energía, temperaturas y otros organismos (Domingo, 2015).

2.1.1 Funciones del suelo

El suelo debe ser visto como un sistema vivo y dinámico, en donde cada uno de sus componentes cumple una función y se complementan para permitir el desarrollo de la vida sobre

éste. Por tanto, dentro del suelo se encuentra una complejidad de procesos que conllevan a una disponibilidad de recursos para la producción (Wang et al., 2023). El suelo cuenta con la capacidad de generar nutrientes para las plantas, por medio de la mineralización de la materia orgánica llevada a cabo por la actividad de la biota edáfica y microbiana y otros factores ambientales como la humedad y la temperatura (Londoño et al., 2007). Además, un suelo puede almacenar agua en su estructura, cada una de las partículas minerales que componen el suelo tienen una fuerza de enlace químico en su superficie y genera una succión del agua que se encuentra en los poros y está en contacto con la partícula (Chen et al., 2023). Estos espacios porosos sirven como vías de conducción del agua, y se pueden generar por el orden de cada partícula, pero también de las interacciones de planta suelo y la actividad de la macrofauna. Por otro lado, el agua que fluye a través de la matriz se relaciona con las partículas del suelo y biota, lo cual regula el agua por el proceso de filtración (Hawker et al., 2020).

2.1.2 Servicios ecosistémicos que ofrecen los suelos

Debido a la alta funcionalidad, el suelo es un recurso con la capacidad de soportar a los ecosistemas y permitir la subsistencia de las comunidades humanas. Debido a esto, los suelos ofrecen servicios ecosistémicos a los seres humanos, que están relacionados con las propiedades físicas, químicas y biológicas (Tovar, 2023). El entorno físico que ofrece el suelo es la base para las actividades de los seres vivos, lo cual favorece el paisaje, el entorno cultural y los sistemas de producción, como la agricultura. Ahora bien, cerca de un 95 % de los suelos a nivel mundial se utilizan para la producción de alimentos (Burbano, 2016). La riqueza de los suelos en el país garantiza una buena disponibilidad de tierras productivas para la seguridad alimentaria y abastecimiento de materias primas como la madera (Mejía, 2017). A su vez, el almacenamiento y fijación de carbono es una de las mayores reservas que ofrece el suelo, por lo que depende de

material vegetal y carbono orgánico de este (Juhos et al., 2021). Por otra parte, la biodiversidad del suelo está compuesta en gran medida por la macrofauna, ya que es la responsable de la materia orgánica, lo que favorece la colonización microbiana, el ciclo de carbono y los nutrientes (Vanolli et al., 2023).

2.2 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el movimiento y la circulación del agua desde la atmósfera hacia la superficie. Esta impulsado por la energía solar y la fuerza de gravedad, por tanto, a medida que se mueve cambia su estado físico (Sousa et al., 2022). La evaporación es el proceso directo en el que la radiación solar calienta la superficie terrestre y de los océanos, lo que produce que el agua se convierta en vapor de agua. Por otra parte, las plantas interactúan con el ambiente y siempre buscan mantener un balance energético y un estado hídrico óptimo, por lo que, el contenido de agua que se encuentra en los espacios intercelulares es expulsado fuera del tejido vegetal a través de estomas, cutículas y lenticelas, conocido esto como transpiración (Xiang et al., 2020). Así mismo, este vapor de agua producto de estos procesos combinados (evapotranspiración), se mueve de zonas de alta a bajas presiones atmosféricas, lo que genera un movimiento ascendente en la formación de nubes. Posteriormente, durante el proceso de ascenso, la masa de aire pasa por zonas con condiciones de baja presión y temperatura, lo que favorece la formación de pequeños cristales de hielo que se congregan alrededor de núcleos de condensación y al adquirir un peso que limita la suspensión en el aire y debido a la saturación de la nube, descienden y por efecto de fricción con el aire y el paso por masas de aire caliente, se genera la precipitación de gotas de lluvia (Xiao et al., 2023). El agua que no ingresa al suelo a través de la infiltración fluye por escorrentía superficial donde es absorbida por las plantas o es evaporada.

2.2.1 Infiltración

La infiltración es un proceso importante dentro del ciclo hidrológico, ésta se define como el flujo de agua que ingresa al suelo por gravedad o acción capilar (Úbeda & Delgado, 2018). La capacidad de infiltración depende de las propiedades físicas del suelo como materia orgánica, porosidad, densidad aparente y densidad real (Liu et al., 2011). Por otro lado, también se encuentra influenciada por la cantidad (mm), la intensidad (mm/hr), la duración, y la frecuencia de la lluvia, el número de días antecedentes sin lluvia, la pendiente del terreno y el porcentaje de cobertura vegetal.

A su vez, el movimiento de agua dentro de la matriz del suelo se ve afectado por fuerzas que desplazan cada gota de una zona con condiciones determinadas, hacia otra. En el momento en que el agua cae al suelo y se infiltra, cada espacio formado entre las partículas del suelo ocupado por aire se presenta como un reservorio y favorece la capitación de películas de agua. Así, luego de que espacios más pequeños sean ocupados y el suelo alcance una humedad estable, la capacidad de campo supera esta capa húmeda y sigue un descenso impulsado por la fuerza de la gravedad (Lozano et al., 2020). En efecto, al momento del agua ingresar al suelo se produce la percolación lo que hace que el agua se mueva dentro del suelo.

2.3 Bosque de roble

El robledal es una capa boscosa dominada por la especie *Quercus humboldtii*, y son reconocidos por su importancia en los bosques altoandinos, lo cual, le confiere desde el punto de vista ecológico, florístico y socioeconómico una relevancia particular (León, 2009). También, son el albergue de mamíferos, aves, y organismos invertebrados, que contribuyen con el enriquecimiento de las orquídeas, helechos, epifitas y líquenes. Por tanto, se convierten en un elemento típico del paisaje (Simijaca et al., 2018). La especie *Q. humboldtii* se encuentra en un

rango altitudinal de 1000 a 3800 m s. n. m., principalmente en el bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), bosque húmedo montano bajo (bh-MB) y bosque húmedo montano (bh-M) (Jiménez, 2010). De igual manera, se reconoce que, los robledales fueron objeto de aprovechamiento durante muchos años, razón por la cual fueron vedados por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), a través del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA) en el año de 1974 (Avella et al., 2010).

2.4 Plantación forestal

Los bosques plantados se reconocen como fuentes sostenibles y ecológicamente racionales, que cumplen múltiples funciones como proteger o recuperar un recurso natural (Lozano & Yaguana, 2021). Aproximadamente el 3% de los todos los bosques son plantaciones forestales, como lo define FAO y PNUMA (2020) “bosques de gestión intensiva, compuestos principalmente por dos o tres especies arbóreas, nativas o exóticas, de la misma edad, plantadas con un espaciado regular y establecidas sobre todo con fines productivos”. De igual manera, disminuyen parcialmente la demanda de madera de los bosques naturales ya que contribuyen a suplir la demanda de esta. Sin embargo, deben de tener un manejo forestal sostenible para garantizar rendimiento, producción, bienes y servicios ecosistémicos (Ramos et al., 2020). Así mismo, se consideran más productivas que los bosques en volumen de madera, pero no dan los beneficios del bosque (Telles et al., 2022).

2.5 Sistema agroforestal

La agroforestería es un sistema sostenible de manejo de uso de la tierra en el que se combinan simultáneamente árboles, especies agrícolas y/o animales. Según Villa et al. (2020) son los sistemas alimentarios sostenibles más importantes del mundo. También, incrementan la

producción agrícola, recuperan, conservan, mejoran la biodiversidad, promueven la fijación de nitrógeno, ciclaje de nutrientes, reservas de carbono y demás beneficios para las poblaciones (Mata et al., 2018). Una de las principales características de los sistemas agroforestales es su capacidad de optimizar la producción del territorio, buscando contribuir con la economía, la sostenibilidad y la producción de las comunidades rurales (Céspedes et al., 2021). Su diseño, elaboración y aplicación se basa en las necesidades de los productores; la implementación es uno de los pilares más importantes en la sustentabilidad del programa por medio de la concientización, identificación y fortalecimiento de las capacidades locales (Estrada et al., 2019).

2.6 Pastizales

Aproximadamente el 40% de la superficie terrestre está cubierta por pastizales naturales, son ecosistemas de vital importancia con vegetación consumida y transformada por animales silvestres y domésticos (Chacón et al., 2022). Se definen ecológicamente como un bioma del cual corresponde el 90% a gramíneas, sin embargo, puede encontrarse herbazales, especies arbustivas y arbóreas (Padilla et al., 2009). El pastoreo ayuda a la seguridad alimentaria de millones de personas y promueven servicios multifuncionales de la naturaleza. Son fuentes de combustibles, alimentos y fibras, ayudan con la regulación del clima, captura de carbono, purificación y recarga de agua (FAO, 2020). Por otro lado, el cambio climático ha contribuido con la degradación de estos, con sequías, enfermedades, inundaciones que producen la pérdida de fertilidad natural de los suelos, generalmente ocurre en zonas áridas y semiáridas, y causa pérdidas productivas y económicas (Jurado et al., 2021).

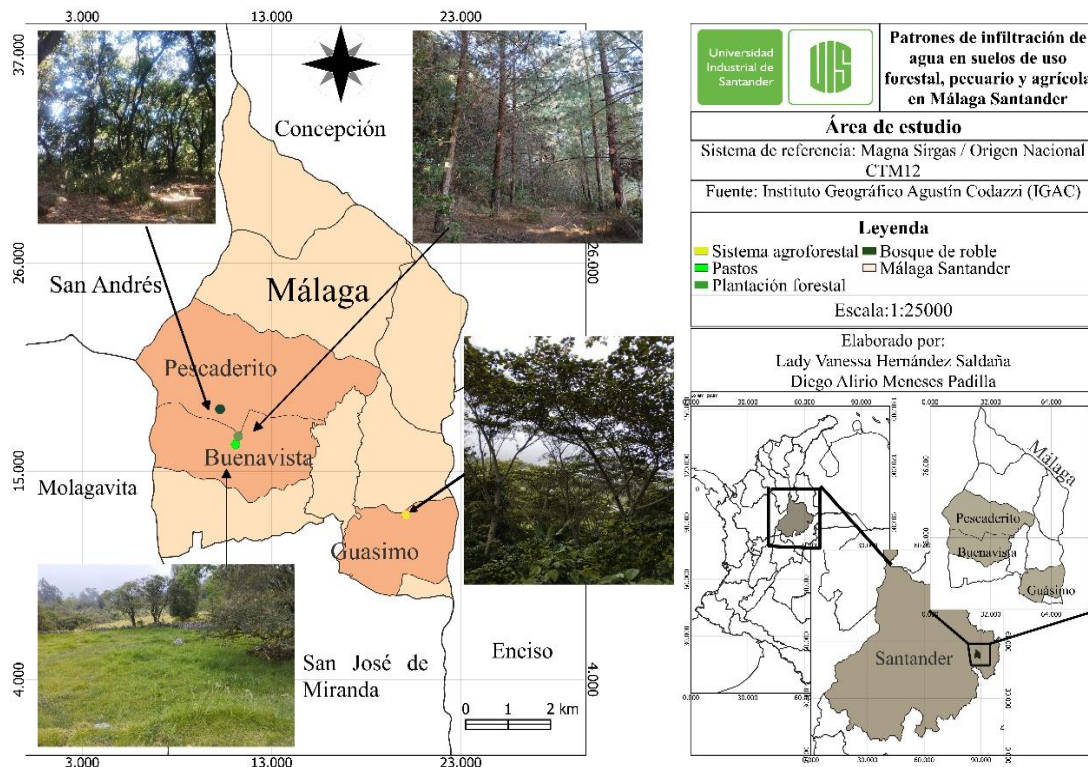
3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio de Málaga, al sur oriente del departamento de Santander; localizado a N 6°42'07" W72°43'56", sobre 2220 m s.n.m., su temperatura oscila entre 15 y 21°C, precipitación media de 1400 mm/año, y humedad relativa del 68,0% (IDEAM, 2021). Presenta relieve quebrado a ondulado, y suelos clasificados como Andisoles, aptos para el desarrollo de actividades productivas agropecuarias. Para el caso del municipio de Málaga, se cuenta con reducidas áreas de bosque natural y plantaciones comerciales (Figura 1).

Figura 1

Mapa de ubicación, área de estudio



3.1.1 Muestreo y toma de información primaria

El muestro de campo se realizó en las veredas Buenavista, Pescaderito y Guásimo, ubicadas en la parte alta, media y baja del municipio, donde fueron identificados y seleccionados los usos: pastos (P), bosque de roble (B), plantación forestal (PF) y sistema agroforestal (SAF) implementados en fincas privadas, a las cuales se accedió previo permiso de ingreso con propietarios (Figura 1).

3.1.2 Muestreo florístico de usos

Para determinar la composición florística de cada cobertura vegetal, fueron establecidas unidades de muestreo como se describe a continuación. Para bosque de roble y sistema agroforestal, se tomaron registros de abundancia de especies, en tres parcelas rectangulares de 250 m² (50 x 5 m), cantidad sugerida por Bermejo et al., (2021) quienes llevaron a cabo estudios de igual alcance en Cundinamarca. En pastos, se empleó la metodología de Sardi et al., (2018), en la cual se ubican seis subparcelas de 1 m² sobre un transecto de 50 m de longitud, donde se identificaron las gramíneas presentes. Finalmente, para la plantación forestal se establecieron tres parcelas circulares de 4 m de radio según (Murillo & Camacho, 1997), los registros en este caso fueron igualmente de abundancia. Los datos aportados del muestreo se usaron como insumos para identificar características de composición florística en cada uso.

3.1.3 Muestreo de infiltración

El estudio de la infiltración tuvo como fin estimar el patrón de tiempo y el espesor de la lámina de agua infiltrada en cada uso. Para esto, se implementó la metodología propuesta por Ibañez et al. (2010), quienes emplean la técnica de doble anillo descrita a continuación. Inicialmente, los dos anillos (uno de 53 y otro de 28 cm de diámetro) se introducen al suelo a una profundidad de 10 cm. En el anillo de menor diámetro, se coloca un plástico para evitar el

impacto directo del agua en el suelo, y el taponamiento de poros. Éste se llena inicialmente hasta una altura de 10 cm y luego se retira el plástico, momento a partir del cual se inicia la lectura del tiempo. Las lecturas se registraron en intervalos de un minuto hasta los primeros cinco minutos, posteriormente, se incrementó el tiempo de medición a cinco minutos, hasta los treinta minutos y, finalmente, en intervalos de diez minutos hasta el minuto sesenta, este mismo procedimiento se repitió 15 veces por uso de suelo.

3.1.4 Muestreo de suelo

Para el muestreo de suelo, fueron seleccionadas siete propiedades físicas (Tabla 1) colectadas en muestras simples: Se delimitó un área equivalente al diámetro del cilindro mayor, en el centro, se tomaron las muestras de humedad y temperatura. La textura, densidad real, densidad aparente, y potencial mátrico se tomaron a un metro del centro (Figura 2). Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de química de la UIS sede Málaga.

Tabla 1

Propiedades físicas del suelo analizadas

Propiedad	Unidad	Tipo de muestra	Método	Profundidad (cm)
Textura (T)	%	Simple	Bouyoucos	30
Densidad aparente (Da)	g/cm ³	Simple	Masa /Volumen	7
Densidad real (Dr)	g/cm ³	Simple	Picnómetro	7
Porosidad total (Pt)	%	Simple	Relación Da – Dr	
Humedad del suelo	%	Simple	Sensor GS3	30
Temperatura	°C	Simple	Sensor GS3	30
Potencial mátrico	kPa	Simple	Tensiómetro IRROMETER	30

Nota. Requerimientos según necesidades del proyecto.

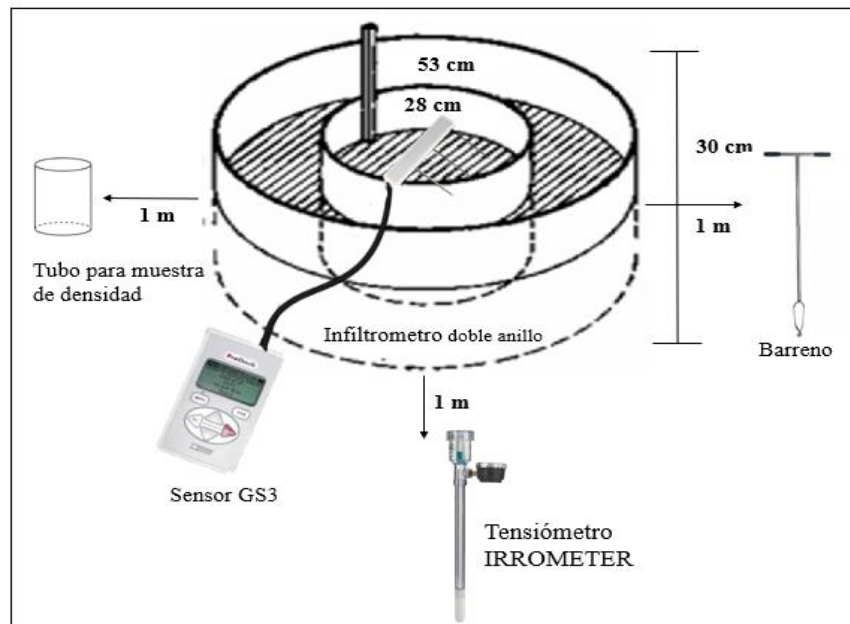
3.2 Modelo de infiltración

Para describir el ingreso de agua en el suelo mediante el cálculo de infiltración, Kostiakov (1932) desarrolló un modelo y ecuaciones matemáticas que relacionan a variables

físicas del suelo con el ingreso del agua. El modelo fue seleccionado, por adaptarse a los parámetros físicos seleccionados para el estudio.

Figura 2

Diseño muestreo en campo



3.2.1 Modelo Kostiakov

El modelo representa la capacidad que tiene un suelo para permitir el ingreso agua desde la superficie hacia su interior, a partir de la relación entre el espesor de la lámina de agua que ingresa, y el tiempo que tarda en hacerlo (Ecuación 1).

Velocidad de infiltración

$$I = at^b \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración, expresada en cm/min.

t = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos.

a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial del tiempo.

b = Exponente adimensional que varía de acuerdo con las características del suelo entre 0 y -1.

3.2.2 Infiltración acumulada

La ecuación determina la cantidad de agua que puede almacenar un suelo en un límite de tiempo determinado, es decir, representa la integración de la velocidad de infiltración en el tiempo (Ecuación 2).

$$I_{cum} = \int_0^t a t^b * dt \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

I_{cum} = Infiltración acumulada.

t = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos.

a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial del tiempo.

b = Exponente adimensional que varía de acuerdo con las características del suelo entre 0 y -1.

3.3.3 Infiltración básica

$$I_b = a(-10b)^b \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

I_b = Infiltración básica

a = Deduce de la ecuación infiltración acumulada

b = Deduce de la ecuación infiltración acumulada

^b = Exponente de velocidad de infiltración del suelo

3.3 Patrones de infiltración

El patrón de infiltración en cada uno de los suelos estudiados se obtuvo a partir de un análisis de correlación, que permitió conocer la relación de la infiltración básica estimada, respecto de las variables edáficas seleccionadas.

3.3.1 Análisis de datos

Los datos generados del trabajo de campo y los análisis de laboratorio, fueron inicialmente procesados mediante técnicas estadísticas descriptivas, para conocer su distribución entorno a la media. Luego, fueron aplicadas técnicas de análisis multivariado como ANOVA de un factor, para establecer niveles de significancia ($p < 0,05$). En este caso, la comparación de medias permitió comprobar o rechazar las siguientes hipótesis:

H_0 = Todos los usos son iguales respecto de la infiltración básica

H_1 = Los usos presentan diferencias significativas respecto de la infiltración básica

Luego, para identificar similitudes se aplicó una prueba de Tukey a los resultados de las variables edáficas y, por último, correlación de Pearson para conocer el grado de relación de las variables respecto de la infiltración básica estimada.

4. Resultados

A continuación, se presentan los productos generados del desarrollo de los objetivos específicos y la metodología planteada.

4.1 Caracterización florística de cada uso de suelo

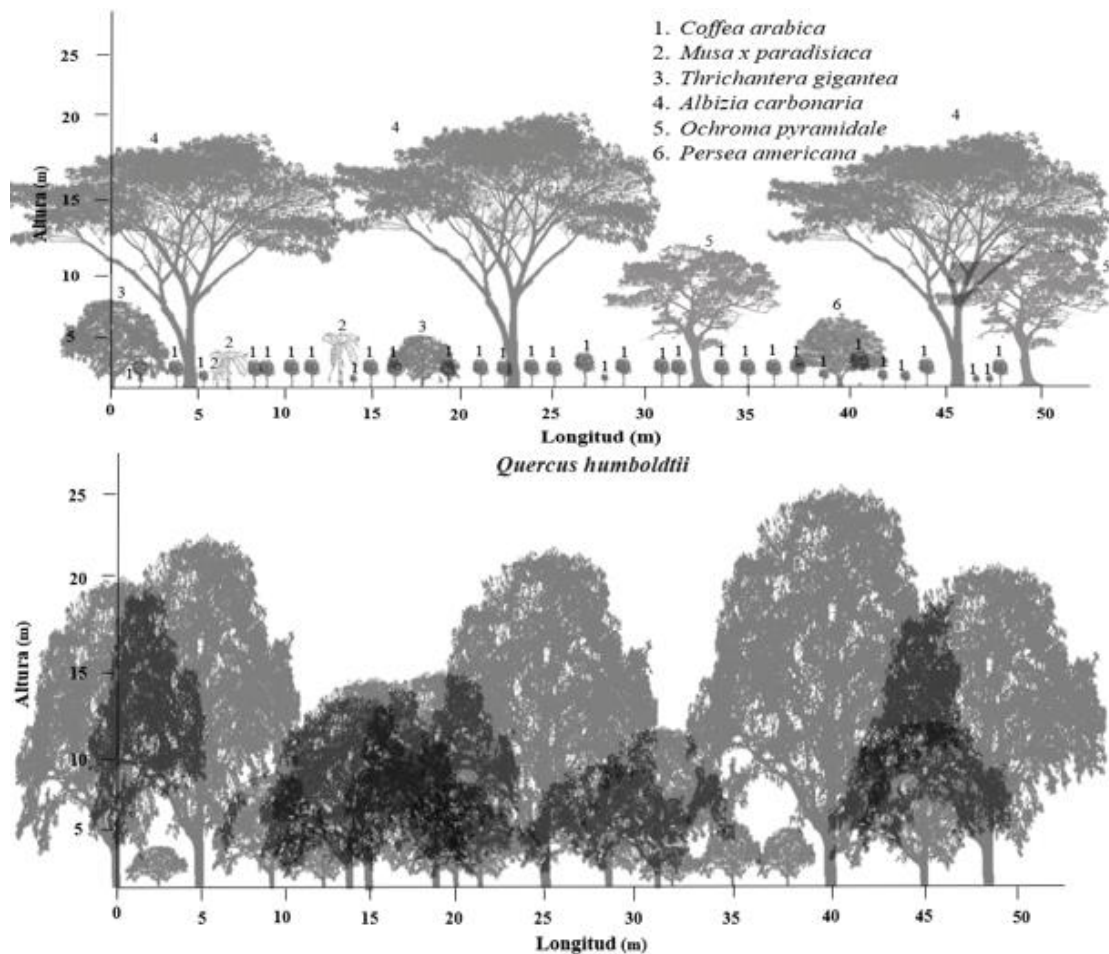
Se identificaron siete especies en el SAF. De estas, *Thrighantera gigantea*, *Albizia carbonaria*, *Inga edulis*, *Persea americana* y *Ochroma pyramidale* presentan hábitos de crecimiento arbóreo. Su uso en las fincas de la zona se debe a las bondades que tienen como aporte de sombra al sistema productivo, así como, un alto grado de adaptabilidad. La mayor abundancia se registra en *A. carbonaria* con el 17,9% de los individuos, seguido de *T. gigantea* e *I. edulis* con el 16,4% y 14,9%, respectivamente, que conforman el estrato superior del SAF. La principal especie a nivel productivo es *Coffea arabica*, identificada en el 100% del área cultivada registra una edad al momento del estudio de 10 años. También, se identificaron algunos individuos dispersos de *Musa x paradisiaca* empleados como sombra transitoria (Figura 3).

Estos elementos, conformaron un segundo estrato, donde se observó una capa de littering de 5 cm. Este sistema productivo, requiere de actividades de manejo como: control de plagas, raleo de sombra y aplicación de agroquímicos llevados a cabo de forma semestral por el propietario (Figura 3). El B, registró tres especies arbóreas entre las cuales *Quercus humboldtii* con el 92,4% se destaca como dominante e importante. *Clusia multiflora* con el 3,8% y *Weinmania tomentosa* con 2,5%, fueron las menos abundantes, un patrón característico de estos bosques en la Provincia de García Rovira donde la homogeneidad de *Q. humboldtii* les merece el nombre de robledales (Avella, 2016). Este uso del suelo presentó tres estratos, y los individuos en su interior registran un distanciamiento promedio de 5 m con alturas entre 5 y 25 m, la capa de Littering fue de 14 cm. Se observó, la ausencia de tratamientos silvícolas motivo por el cual los

problemas de plagas y manejo de la sucesión son un problema que puede comprometer la estabilidad del ecosistema (Figura 3).

Figura 3

Perfil de vegetación (A)



Nota. A = Sistema agroforestal, B = bosque de roble

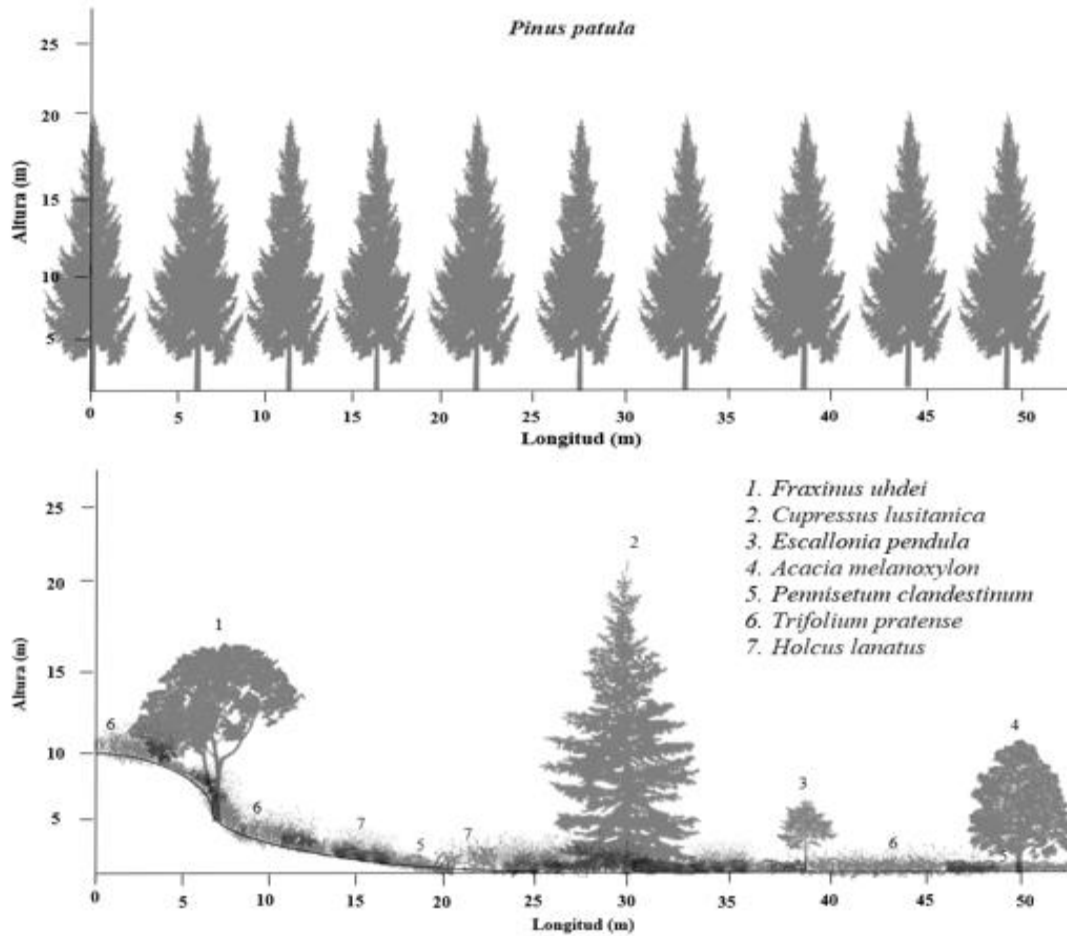
El uso del suelo forestal comercial (PF), corresponde a una plantación establecida con la especie *Pinus patula*. El área plantada registra 14 años de crecimiento y cuenta con una densidad de 600 árboles/ha. La plantación fue intervenida con podas de formación, fertilización y entresacas, llevadas a cabo en los años 4 y 10 del turno final proyectado a 15 años. Labores consideradas adecuadas para este tipo de cultivos donde el objeto de establecimiento es la

producción de madera en bloque, producto favorecido por este tipo de intervenciones. A nivel estructural, se caracteriza por un solo estrato cuya altura promedio es 20 m, donde la capa de Littering fue de 7 cm (Figura 4).

Finalmente, el uso pecuario (P) al igual que la plantación forestal y el sistema agroforestal, tiene un carácter productivo y su implementación en la vereda Buenavista data de 40 años (dato aportado por el propietario). Se basa en un sistema de pastoreo rotativo donde las gramíneas: *Pennisetum clandestinum*, *Trifolium pratense* y *Holcus lanatus* crecen combinadas, con un desarrollo de altura entre los 50 y 60 cm. Para esta cobertura, se realizan aplicaciones de agroquímicos y construcción de zanjas de drenaje. Su capa de Littering de 2 cm la más baja de las coberturas estudiadas. También, se identificaron algunos individuos arbóreos dispersos de *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica*, *Escallonia pendula* y *Acacia melanoxylon* (Figura 4).

Figura 4

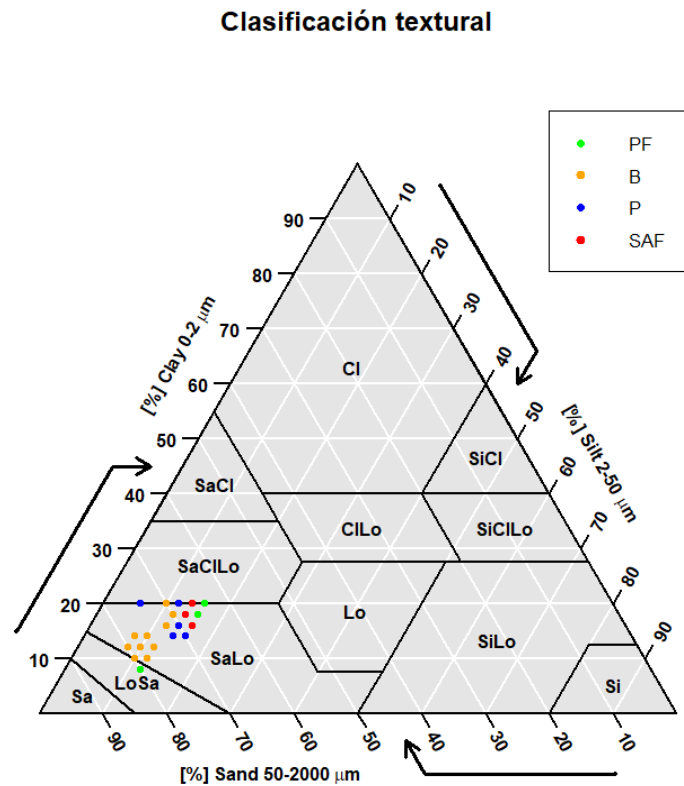
Perfil de vegetación (B)



Nota. C = Plantación forestal, D = Pasto

4.2 Identificación de las propiedades física del suelo en cada uso establecido

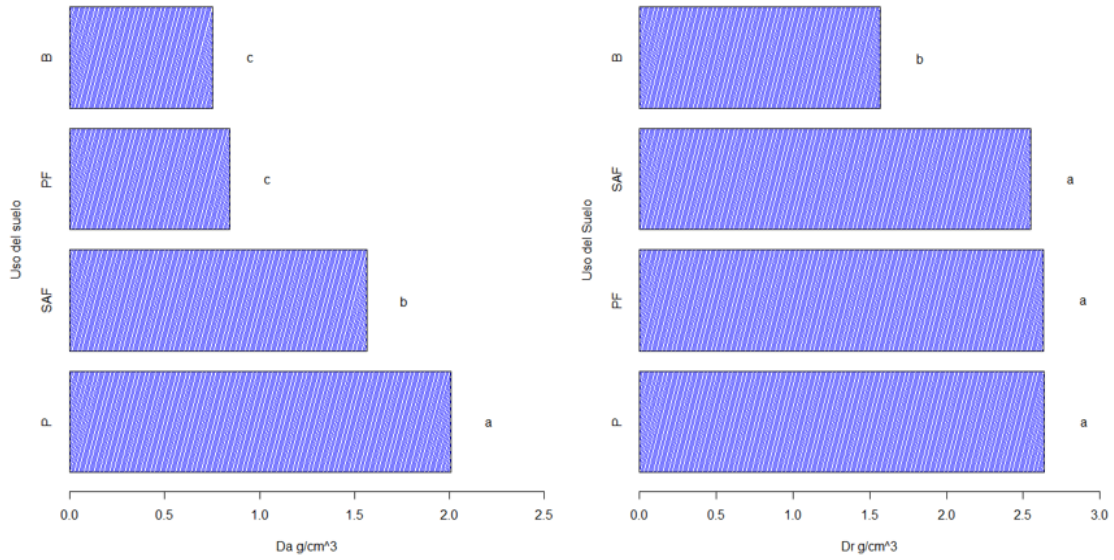
Los atributos físicos de los suelos estudiados muestran textura similar en los cuatro usos, siendo esta Franco Arenosa (FA). Por su parte, la categoría Franca (F), se presenta como una característica típica de estos suelos, refleja el equilibrio en la fracción sólida mineral del suelo en las coberturas analizadas. Este resultado, también evidencia un estado ideal del sistema suelo como soporte de coberturas naturales y artificiales, aspecto que impacta igualmente las relaciones químicas y biológicas en un escenario de conservación del recurso natural (Figura 5).

Figura 5*Clasificación textural usos del suelo*

La prueba de Tukey arrojó diferencias significativas ($p < 0,05$) para densidad aparente, porosidad total y humedad en los cuatro usos de suelo (Figuras 6 y 7). Para el caso de PF - B, se obtuvo igualdad en densidad aparente, y en el SAF - P esta se mostró como diferente. En el caso de la densidad real, se obtuvo igualdad en P, PF y SAF. Por último, la porosidad total y humedad, hubo igualdad en B - PF y SAF - P (Tabla 2).

Figura 6

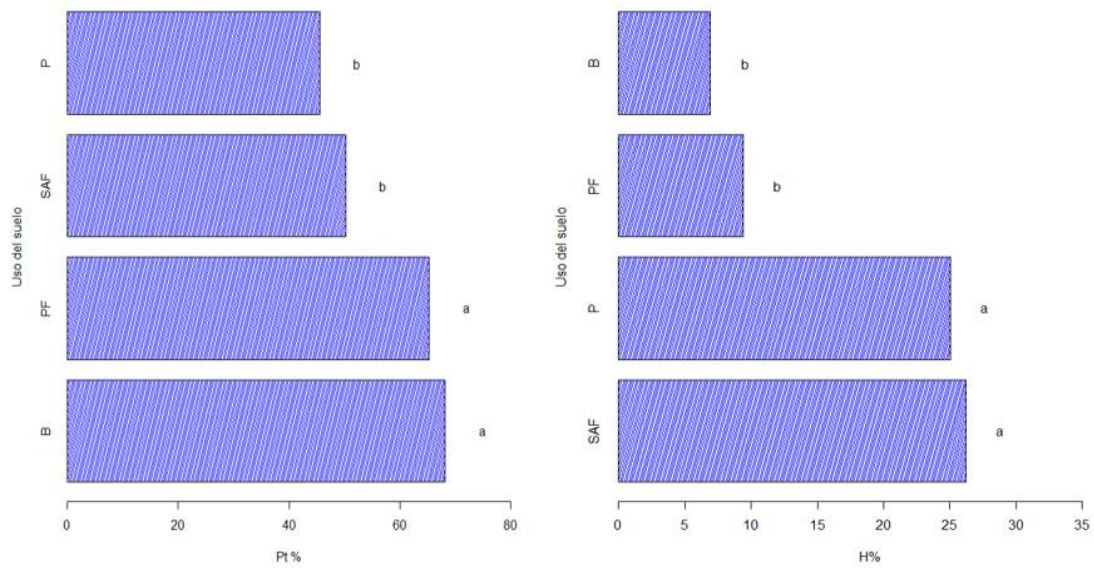
Comparación de medias para densidad aparente y real por uso del suelo



Nota. Prueba de tukey $p < 0,05$.

Figura 7

Comparación de medias para porosidad total y humedad por uso del suelo

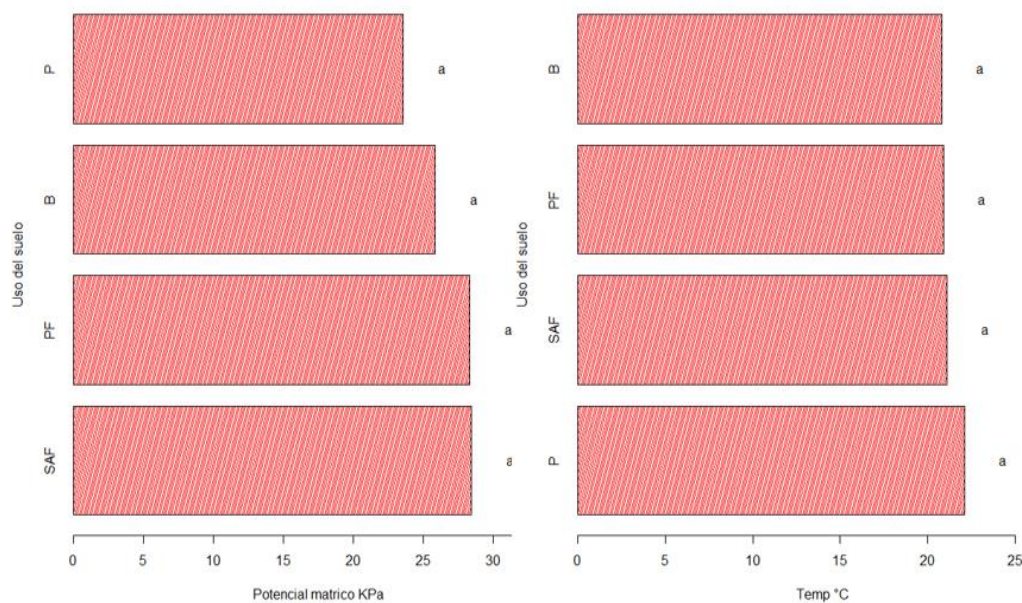


Nota. Prueba de tukey $p < 0,05$.

Las variables temperatura y potencial mátrico, no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en los cuatro usos del suelo. En el caso de la temperatura, la ubicación de los puntos de muestreo en localidades de relativa cercanía pudo tener incidencia para este resultado. Y para potencial mátrico, el historial pecuario de estas áreas, fue un factor que pudo incidir en los resultados (Figura 8).

Figura 8

Comparación de medias para temperatura y potencial mátrico por uso del suelo



Nota. Prueba de Tukey $p > 0,05$.

Tabla 2

Valor promedio y desviación estándar parámetros físicos del suelo por uso

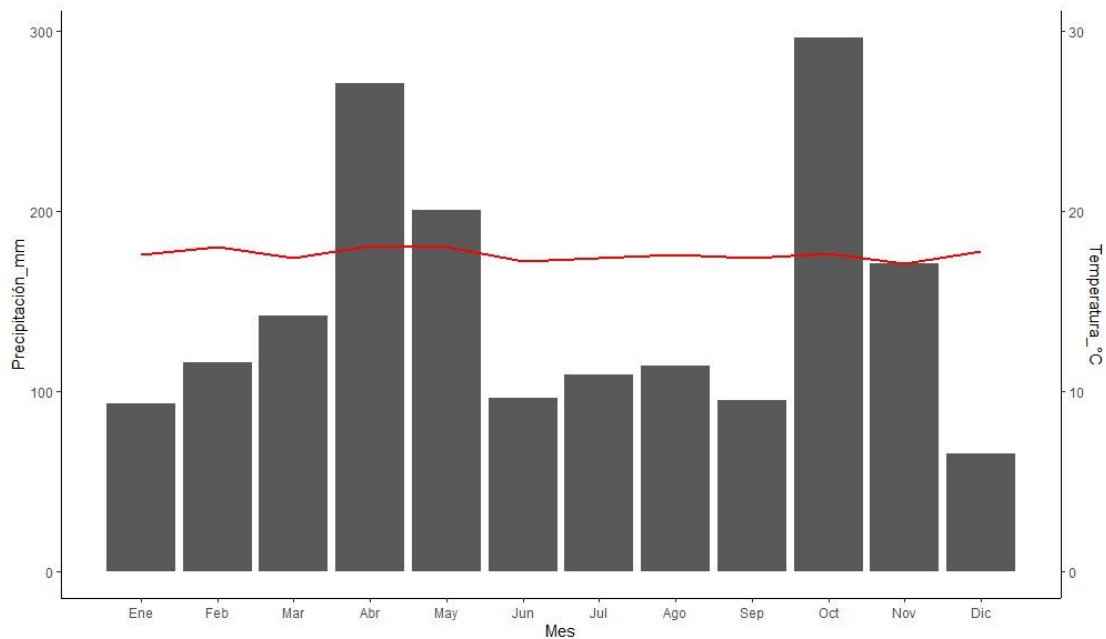
Usos	Da (g/cm ³)	Dr (g/cm ³)	Pt (%)	T (°C)	H (%)	Potencial mátrico
B	0,7 ± 0,05	1,5 ± 0,37	68,1 ± 7,32	20,8 ± 2,91	6,9 ± 3,88	25,8 ± 9,29
SAF	1,5 ± 0,07	2,5 ± 0,11	50,1 ± 2,68	21,0 ± 2,35	26,2 ± 6,93	28,4 ± 3,64
PF	0,8 ± 0,22	2,6 ± 0,06	65,2 ± 7,83	20,8 ± 6,85	9,4 ± 9,13	28,2 ± 11,77
P	2,0 ± 0,33	2,6 ± 0,03	45,5 ± 8,10	22,1 ± 3,91	25,6 ± 13,71	23,54 ± 10,99

4.2.1 Caracterización climática zona de estudio

La precipitación total mensual promedio del municipio de Málaga en el periodo 2019 a 2023 presentó distribución bimodal. Los meses de marzo a mayo con 613,6 mm corresponden a la primera época de lluvias (lluviosa menor), y una segunda época, se concentra en los meses de octubre a noviembre con 467,6 mm (lluviosa mayor). Octubre con el 16,7% es el mes de mayor precipitación seguido de abril y mayo con el 15,3% y 11,3%, respectivamente. El restante de los meses para el periodo analizado, registran una media de 113,3 mm/mes. La temperatura, no fue una variable del clima con variación marcada comparada con la precipitación. Para el municipio, los valores oscilaron en un rango de 17,08 a 18,12 °C, siendo abril el mes más caluroso y noviembre donde se registran las temperaturas más bajas (Figura 9).

Figura 9

Distribución de precipitación y temperatura municipio de Málaga periodo 2019 - 2023



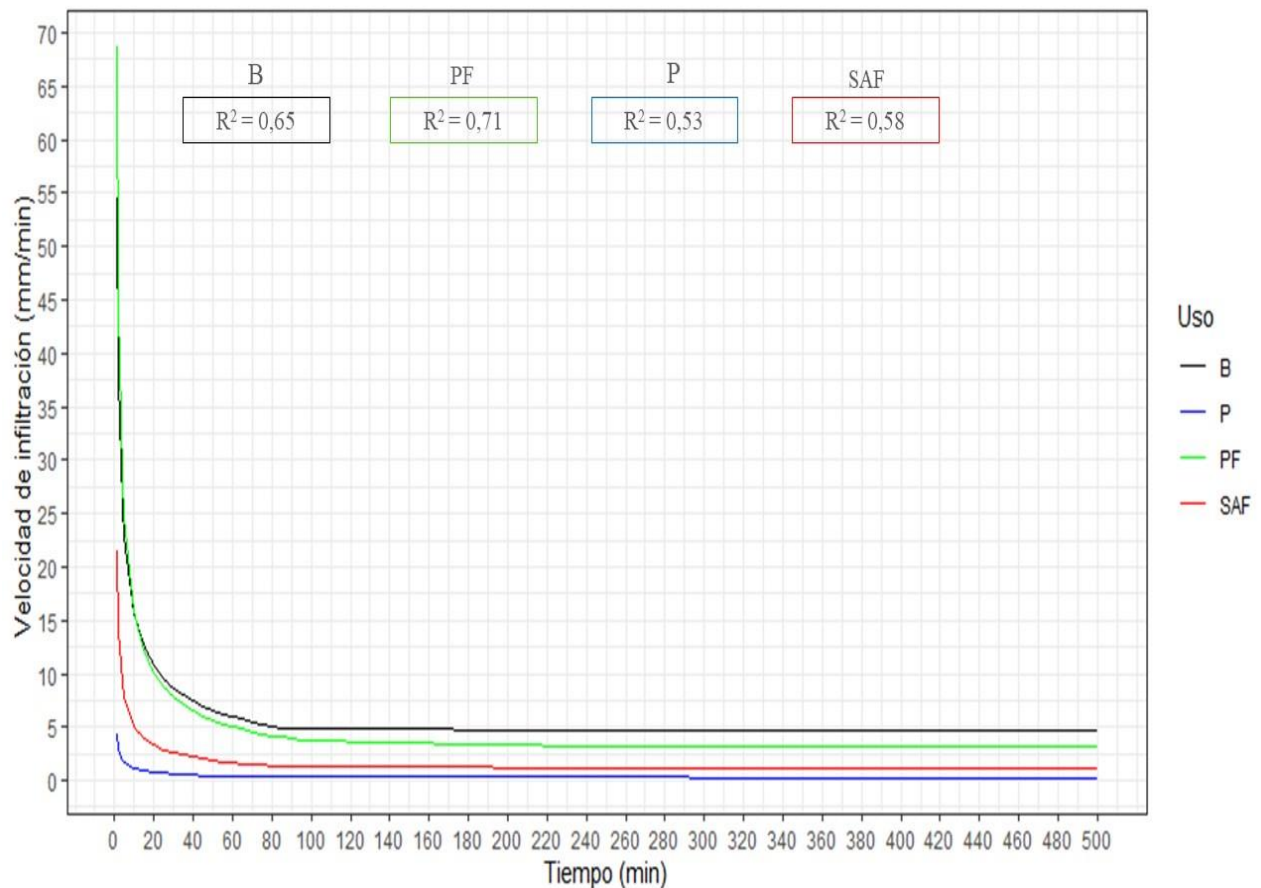
Nota. Datos obtenidos de IDEAM estación 24030950

4.3 Capacidad de infiltración para cada uso del suelo

4.3.1 Velocidad de infiltración

La prueba de infiltración de doble anillo arrojó patrones diferentes en los suelos estudiados. Los primeros 15 min, mostraron mayores valores en la velocidad de infiltración en suelos con PF y B, contrario a suelos con P y SAF, donde los resultados representaron una disminución entre el 19% y 25% de la velocidad de infiltración. A los 45 minutos después de iniciado el ensayo, se presentó el cambio más drástico en la línea de velocidad para los cuatro usos. La PF paso de 68,6 mm/min a 6,05 mm/min, en el caso del B este cambio representó 90,3%, en P fue del 91,7% y para SAF del 92,6% (Figura 10).

La velocidad de infiltración se estabilizó primero en los usos B y PF, con diferencia de 27 minutos a partir del minuto 249. Lo anterior, equivale a una velocidad en B de 4,7 mm/min, y en la PF de 3,3 mm/min. En el caso del SAF, el proceso de estabilización se dio en el minuto 288 con una velocidad de 1,1 mm/min. El P fue el uso del suelo donde menor velocidad de infiltración se obtuvo con 0,3 mm/min esto a los 340 minutos de iniciada la prueba en campo. Por último, los resultados muestran como el modelo de Kostiakov se ajustó mejor en los usos PF y B respecto de la velocidad de infiltración, contrario al P y SAF donde el ajuste lo logró una simulación de la variable con precisión considerable (Figura 10).

Figura 10*Velocidad de infiltración para cuatro usos*

4.3.2 Infiltración acumulada

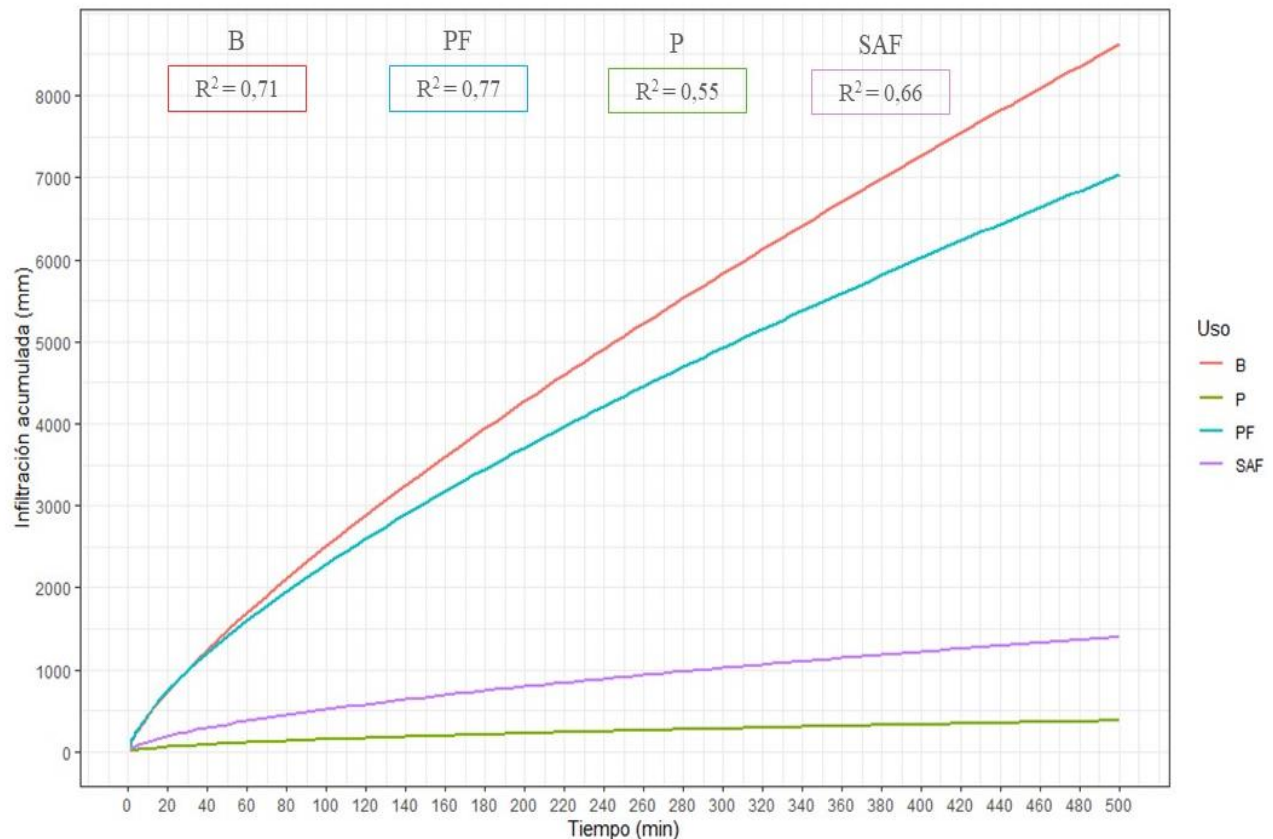
La cantidad de agua obtenida como paso del líquido en los usos del suelo, mostró un patrón coherente con los resultados de velocidad de infiltración. Se presentó igualdad entre B y PF hasta el minuto 30, y partir de este tiempo, la variable se comportó diferente hasta el final de la prueba. Para el caso de B, este alcanzó a los 500 minutos el máximo de agua acumulada con 8621 mm, y la PF en este mismo tiempo arrojó un valor de 7035 mm, valores que según la precisión estimada no se consideran diferentes (Figura 11).

Los dos usos restantes, no presentaron un referente de tiempo similar durante el desarrollo de la prueba. Para el SAF, se obtuvo a los 250 minutos un valor de 914 mm, y

finalizada la prueba este uso arrojó un valor de 1400 mm. El P, fue el uso con los menores valores de agua acumulada, en este caso, a los 250 minutos se presentó una diferencia de 658 mm respecto del SAF, que aumentó a 379 mm al cierre de la prueba de campo (Figura 11).

Figura 11

Infiltración acumulada para cuatro usos

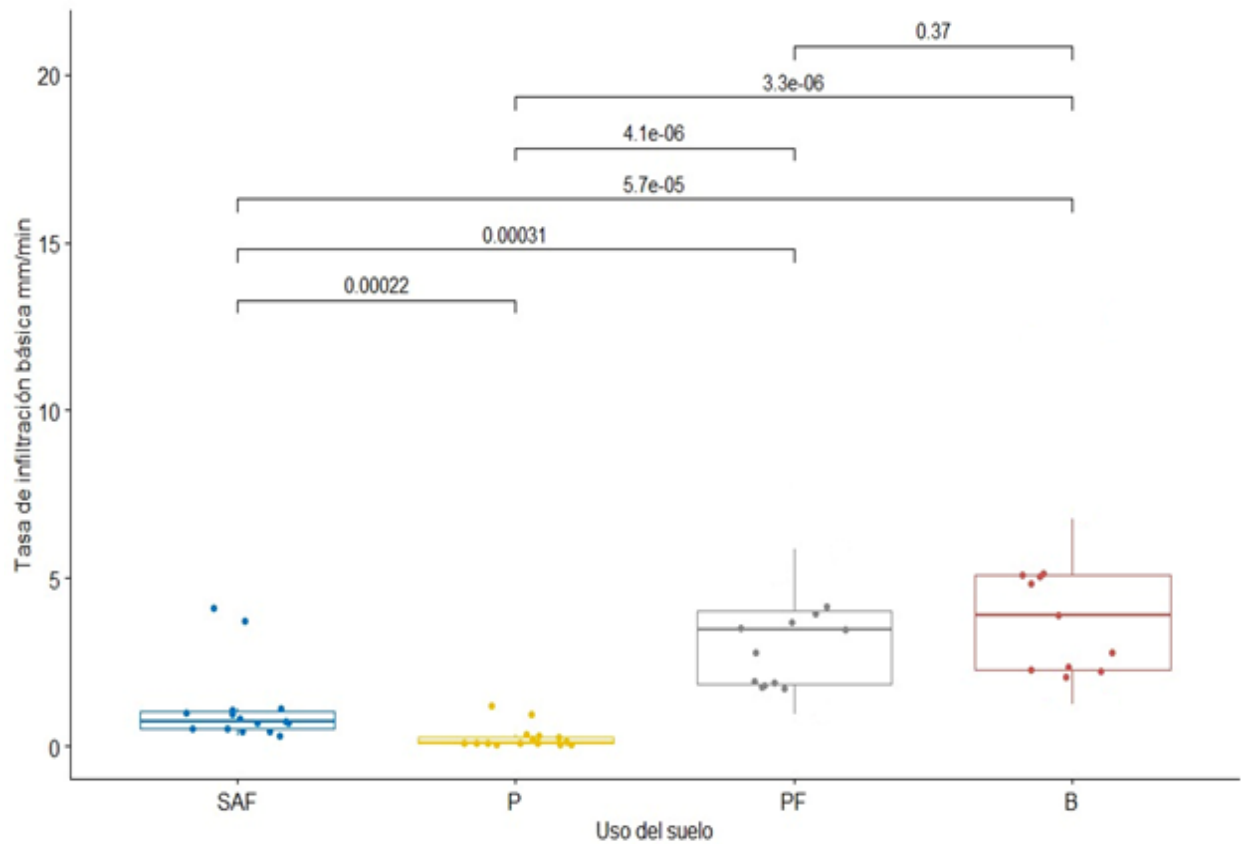


4.3.3 Infiltración básica del suelo

La infiltración básica, según el análisis de varianza mostró diferencias significativas en los cuatro usos del suelo estudiados ($p < 0,05$). En tal sentido, se acepta H1 como hipótesis inicial de estudio, donde los ensayos de campo reflejan estabilidad de la variable desde el minuto 249. La prueba de Tukey mostró igualdad respecto de la infiltración básica ($p < 0,05$), solo en B - PF (Figura 12).

Figura 12

ANOVA de un factor y prueba de Tukey para infiltración básica



4.4 Patrones de infiltración para los usos de suelo definidos

El patrón de infiltración de los cuatro usos del suelo, mostró una relación mayor respecto de la porosidad total, densidad aparente y humedad. Para el caso de la porosidad total, la PF y el B fueron los usos del suelo donde se presentó la relación mas fuerte (Figura 13). En P y SAF, la relacion fue igualmente positiva y fuerte (Figura 14). La humedad fue una variable con relación fuerte pero inversa en los cuatro usos del suelo. En el B, obtuvo el valor más alto, y el mínimo se presentó en P. Por último, la densidad aparente también arrojó valores de correlación fuerte e inversos, siendo el B donde se obtuvo el valor más alto, sin embargo, los restantes usos del suelo estudiandos presentan también correlación muy alta e inversa (Figura 13 y Figura 14).

Figura 13

Correlograma de infiltración básica bosque y plantación forestal con variables edáficas Málaga

– Santander

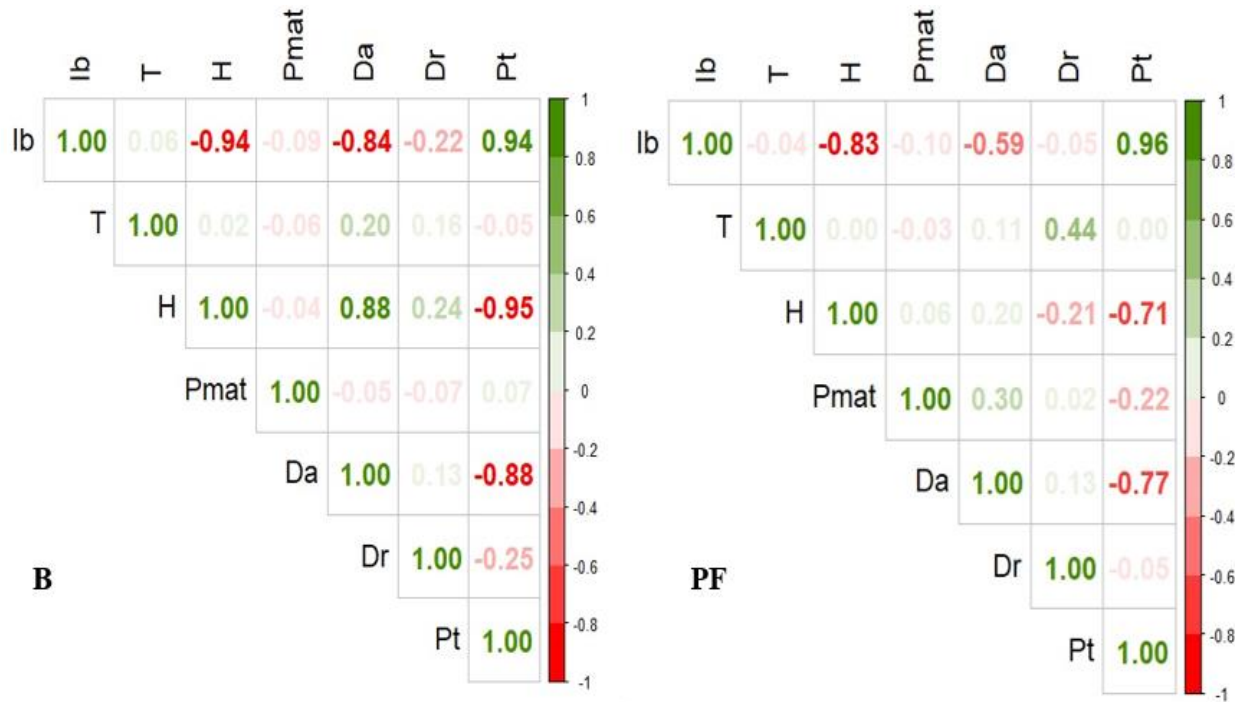
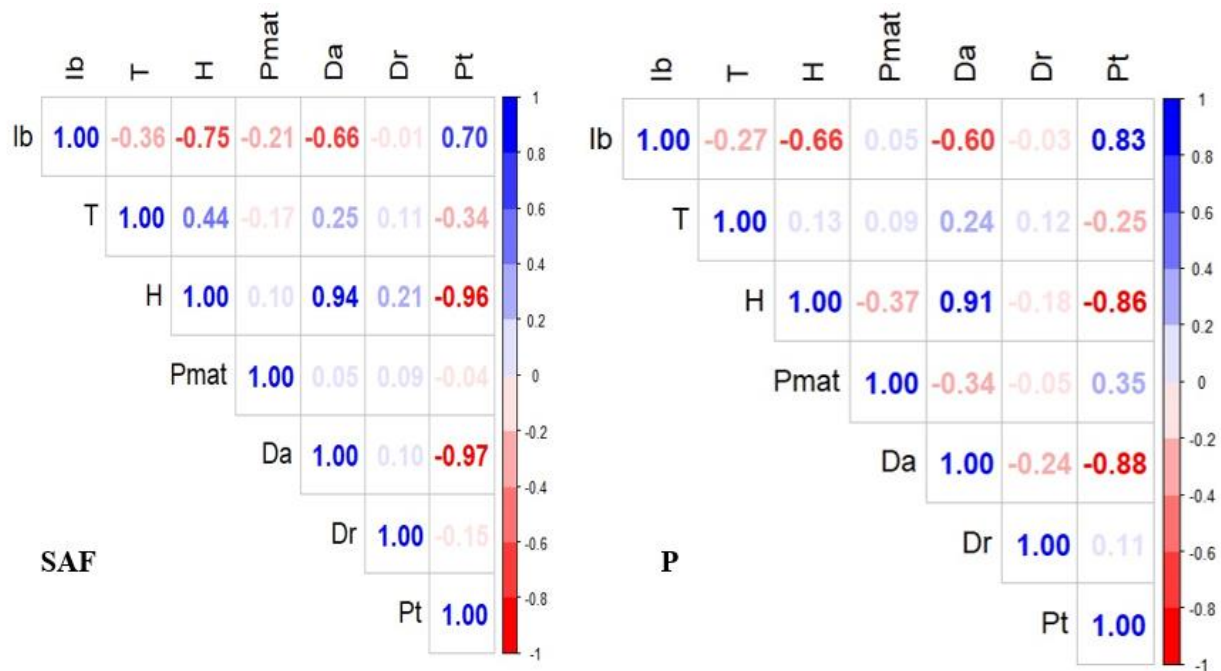


Figura 14

Correlograma de infiltración básica sistema agroforestal con pastos, variables edáficas Málaga

– Santander



En términos generales, el patrón de infiltración para el contexto de estudio y los resultados arrojados de las pruebas de campo y análisis estadístico, mostró como la mecánica del suelo tiene una incidencia alta en los tiempos de ingreso del agua al suelo. Respecto de variables como potencial mátrico no incluido en los estudios previos revisados, los resultados mostraron a esta variable como no relacionada con la infiltración en ninguno de los usos estudiados. Situación similar para la temperatura y la densidad real donde las correlaciones fueron débiles respecto de la infiltración.

5. Discusión

Cómo era de esperarse, los cuatro usos del suelo estudiados fueron diferentes en estructura y composición. El SAF, presentó dos estratos conformados a partir de tres especies agrícolas y cuatro forestales, resultados que difieren de los obtenidos por Zapata (2019) en Cundinamarca, al comparar tres modelos agroforestales de café con maderables, los cuales presentaron tres estratos y una composición de 43 especies arbóreas. El B, dominado por la especie *Quercus humboldtii* y constituido por dos especies más en tres estratos, fue diferente a reportes de Ospina & Paz (2012) en la región andina del Cauca, donde reportan 51 especies forestales. La PF, fue un uso del suelo donde el manejo silvicultural se destaca como importante, algo que Castellanos et al. (2008) también reconocen como fundamental en este tipo de cultivos productivos donde la composición y estructura es homogénea. Finalmente, para el P se encontraron gramíneas y cuatro especies forestales dispersas, resultado similar obtenido por Vásquez et al. (2020) quienes identificaron árboles de *Cupressus lusitanica* y *Acacia melanoxylon* en fincas ganaderas del Perú asociadas con *Pennisetum clandestinum* como el caso tratado.

Las variables edáficas analizadas en el estudio mostraron diferencias entre los usos seleccionados, resultados que concuerdan con Núñez et al. (2022) quienes compararon propiedades físicas en usos de suelo similares; y concluyen que las actividades productivas pueden ser un agente que promueva este tipo de modificaciones en la mecánica del suelo. Respecto de la precipitación, nuestros resultados confirman el patrón bimodal de esta variable del clima en la región de estudio para un periodo de cinco años, comportamiento que Pinilla & Pinzón (2012) igualmente reportan para el departamento de Santander en un periodo de análisis de 35 años. Respecto a la velocidad de infiltración, fue una variable que se caracterizó por dos momentos específicos de estabilidad, donde el bosque y la plantación forestal alcanzaron el

primer tiempo, seguido del SAF y P. Resultados que corroboran Béjar et al. (2021) quienes reportan valores altos de infiltración básica y acumulada en usos forestales empleando igualmente, método de doble anillo y modelo de Kostiakov. Así mismo, el estudio realizado por Gómez et al. (2014) concuerda con los resultados obtenidos, estos autores indican que las tierras de pastoreo presentan menor tasa de infiltración.

Los patrones de infiltración en cada uso del suelo presentaron condiciones diferentes. Los valores más bajos de infiltración se presentaron en usos de suelo agrícola y pecuario; valores afectados negativamente por la densidad aparente y la porosidad del suelo, información que concuerda con la obtenida por García et al. (2021) donde la infiltración más baja se presentó en estas actividades productivas agrícolas y pecuarias, donde la densidad aparente y porosidad total presentaron valores críticos de compactación.

El B fue el uso del suelo con mayor capacidad de regulación hídrica, debido a que este uso alcanzó una estabilidad en la tasa de infiltración en el menor tiempo, en comparación con suelos destinados a la ganadería y agricultura. Así mismo, al permitir un ingreso mayor de agua en el suelo, y a la presencia de variabilidad en sus estratos, este uso del suelo ofrece una disponibilidad hídrica constante independientemente de la variabilidad de las precipitaciones. Resultado similar con García et al. (2018) quienes mencionan que la cobertura de pastizal fue la que proporcionó menor capacidad de regulación hídrica, una mayor pérdida por evapotranspiración y un almacenamiento de humedad del suelo comparativamente menor.

6. Conclusiones

La caracterización florística de los cuatro usos del suelo estudiados, mostros diferencias a nivel de composición y estructura. En tal sentido, la información aportada refleja las bondades de cada uso del suelo en el contexto local como alternativa productiva, sobre la cual es posible desarrollar investigaciones que permitan comprender la relación de estas con el ciclo hidrológico.

La textura, el potencial mátrico, y la temperatura fueron atributos físicos del suelo que no presentaron diferencias en los cuatro usos. En cambio, densidad aparente fue igual en PF - B, densidad real en P - PF y SAF, para la porosidad total, hubo igualdad en B – PF y SAF y P y, finalmente, la humedad tuvo similitud entre en SAF - P y PF - B. De esta forma, se concluye que los atributos físicos del suelo presentan variaciones asociadas al tipo de cobertura y uso del suelo en la zona de estudio.

La velocidad de infiltración y la infiltración acumulada confirman el rol que tienen los bosques y plantaciones forestales en la regulación de la fase final del ciclo hidrológico. Estos usos del suelo reflejaron durante los ensayos de campo los valores más altos de estas variables, que validan la estabilidad de la interfaz suelo planta, cuando se mantiene la coherencia entre el uso y las actividades productivas y de conservación.

La infiltración básica estimada, mostró diferencias entre usos del suelo. En tal sentido, la cobertura, composición y estructura de estos, son elementos que afectan las variables determinantes de los valores obtenidos en el estudio, donde los dos usos de mayor complejidad estructural obtuvieron los valores iniciales mayores, una muestra de la importancia de estas en la región para la gestión del recurso hídrico.

La densidad aparente, porosidad total y humedad fueron las variables físicas del suelo que mayor influencia presentaron sobre la capacidad de infiltración, lo que demuestra que

actividades productivas inadecuadas pueden generar alteraciones a las propiedades físicas y, en consecuencia, una reducción en el proceso de infiltración de agua en el suelo.

7. Recomendaciones

Para este tipo de estudios, es necesario ampliar las mediciones hacia otros usos del suelo en los municipios de la provincia de García Rovira, donde las intervenciones del patrimonio ambiental y forestal son frecuentes, situación que debe ser abordada no solo desde la reducción o aumento de coberturas vegetales.

Aumentar el tiempo de medición de la infiltración, de tal forma que se logre consolidar una base de datos que cubran el patrón de distribución bimodal de la precipitación en las zonas de estudios, lo anterior, permite establecer un escenario integral del comportamiento del agua en su proceso de ingreso al suelo.

Continuar el estudio de la infiltración en bosques naturales y plantaciones forestales, en el departamento de Santander, donde estos dos usos del suelo se proyectan como alternativas de sostenibilidad y desarrollo económico en la ruralidad al nororiente del país.

Referencias Bibliográficas

- Arroyave, S. S. M., & Restrepo, C. J. F. (2009). *Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica**.
- Avella, M. A. (2016). *Los bosques de robles (fagáceas) en Colombia: composición florística, estructura, diversidad y conservación*.
- Avella, M. A., & Camacho, C. L. M. (2010). Conservation and sustainable use of oak forests in the Conservation Corridor Guantiva-La Rusia-Iguaque, Santander and Boyacá, Colombia. In *Revista Colombia Forestal* (Vol. 13, Issue 1).
- Béjar, P. S. J., Cantú, S. I., Yáñez, D. M. I., & Luna, R. E. O. (2021). *Evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo*.
- Bermejo, C. L. T., García, Hi. A. B., & Soler, U. L. F. (2021). *Influence of vegetation on hydraulic conductivity in three types of forest coverage: Vol. XLII* (Issue 2).
- Bouma, J. (2012). Hydropedology as a Powerful Tool for Environmental Policy and Regulations: Toward Sustainable Land Use, Management and Planning. *Hydropedology*, 483–512. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00015-0>
- Burbano Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Carpio, A. L. Del, & Taype, H. I. (2021). Multitemporal analysis of plant associations and land use changes in a high andean locality, Puno-Peru. *Uniciencia*, 35(2). <https://doi.org/10.15359/RU.35-2.3>

- Castellanos, B. J. F., Treviño, G. E. J., Aguirre, C. Ó. A., Jiménez, P. J., Musalem, S. M., & López, A. R. (2008). *Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México*.
- Céspedes, C., Sigrid, L., & Schuldes, V. (2021). *Editoras colección libros inia N° 45 Agroecología*.
- Chacón, K., & Gutman, D. (2022). *Pastizales naturales, Instituto Interamericano de cooperación para la agrocultura (IICA)*.
- Chen, K., He, X., Liang, F., & Sheng, D. (2023). Contribution of capillary pressure to effective stress for unsaturated soils: Role of wet area fraction and water retention curve. *Computers and Geotechnics*, *154*, 105140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105140>
- DANE. (2018). *Boletín Técnico* (DANE, Ed.).
- Domingo, R. P. (2015). *CONICET_Digital_Nro.66b9de1e-bdc7-401d-815c-d81d3421f23c_B*.
- Estrada, M., Achkar, M., & Donadío, A. (2021). Comportamiento de la tasa de infiltración y su relación con parámetros físico – químicos de los suelos como indicadores en la mejora de la conservación del agua, en los lugares intervenidos con el proyecto + agua + identidad. *Geo UERJ*, *39*, e51481. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2021.51481>
- Estrada, N., Fernando, J., Benavides, B., Álvarez, B., Vicente Jorge Fernando Navia Estrada, F., Benavides Benavides, O., & Vicente Barraza Álvarez, F. (2019). *Caracterización de sistemas agroforestales tradicionales en el pacífico sur de Colombia, departamento de Nariño*.
- FAO. (2020). *Cross-border coordination of livestock movements and sharing of natural resources among pastoralist communities in the Greater Karamoja Cluster*.

- FAO y PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. In *El estado de los bosques del mundo 2020*. FAO and UNEP. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- García, C. S., Silva, I. C., Rodríguez, H. G., Díaz, M. I. Y., Monsiváis, J. G. M., & Meza, M. V. G. (2021). Effect of different land use in the physical and hydrological properties of a Luvisol in the state of Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 151–177. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982>
- García, L. V., Villegas, J. C., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino, M. L., Betancur, T., & León, J. D. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Gómez, G. C., Munive, C. R., Mallma, C. T., & Orihuela, V. C. (2014). *Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas*.
- Hawker, Smith, Mae, Bell, Parker, & Ja. (2020). *La Gestión del Suelo y los Servicios Ecosistémicos. EO4cultivar Proyecto Guía de Gestión de Colombia*.
- Huaman, H. J. L. (2016). *Universidad tecnológica de los Andes facultad de ingeniería escuela profesional de ingeniería ambiental y recursos naturales*.
- Ibañez, A. S., Moreno, R. H., & Gisbert, B. J. M. (2010). *Características del infitrómetro de doble anillo*.
- IGAC. (2021). *Clasificación de las tierras por su capacidad de uso*.
- Jiménez, F. A. S. (2010). Aproximación a la fauna asociada a los bosques de roble del corredor Guantiva – la Rusia – Iguaque (Boyacá–Santander, Colombia). In *Revista Colombia Forestal* (Vol. 13, Issue 2).

- Juhos, K., Madarász, B., Kotroczó, Z., Béni, Á., Makádi, M., & Fekete, I. (2021). Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators — A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation. *Geoderma*, 385, 114918. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918>
- Jurado, G. P., Velázquez, M. M., Sánchez, G. R. A., Álvarez, H. A., Domínguez, M. P. A., Gutiérrez, L. R., Garza, C. R. D., Luna, L. M., & Chávez, R. M. G. (2021). The grasslands and scrublands of arid and semi-arid zones of Mexico: Current status, challenges and perspectives. In *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias* (Vol. 12, pp. 261–285). INIFAP-CENID Parasitología Veterinaria. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>
- León, J. D. ; V. G. Y. A. P. (2009). Revista de Biología Tropical. *Colombia Revista de Biología Tropical*, 57, 1165–1182. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44918949031>
- Leyva S, Aime B, & Reyes M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 36. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.81>
- Lince, S. L., & Sadeghian, S. (2021). Taxonomía de suelos. Consideraciones para la zona cafetera de Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*, 45, 1–31. <https://doi.org/10.38141/10781/045>
- Liu, H., Lei, T. W., Zhao, J., Yuan, C. P., Fan, Y. T., & Qu, L. Q. (2011). Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*, 396(1), 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.028>
- Londoño, Á. A. D., Montoya, G. C., León, P. D., & González, H. M. I. (2007). Antioquia, Colombia, In *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* (Vol. 60, Issue 1).

- Lopez, A. K. L. (2022). Evaluación de la dinámica de agua en Hydrus-1D para tres suelos de ladera cultivados con aguacate Hass (*Persea americana*) en el Valle del Cauca, Colombia. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 10(1), 75–98. <https://doi.org/10.17081/invinno.10.1.4811>
- Lozano, D., & Yaguana, C. (2021). Funcionalidad ecológica en plantaciones de eucalipto, en el Bosque Nacional Ipanema: ¿cuál es la importancia de las plantaciones forestales en la restauración de áreas degradadas? *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 10–31. <https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1094>
- Lozano, T. S., Olazo Aquino, J., Pérez, L. M. I., Castañeda, H. E., Díaz, Z. G. O., & Santiago, M. G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *revista terra latinoamericana*, 38(1), 57. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>
- Luna, F. W., Estrada, M. H., Jiménez, O. J. J. M., & Pinzón, L. L. L. (2012). *Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias*.
- Mata, A. D., Rivero, H. M., & Segovia, M. E. (2018). *Sistemas agroforestales con cultivo de cacao fino de aroma: entorno socio-económico y productivo Agroforestry systems with fine aroma cocoa cultivation: socio-economic and productive environment* (Vol. 6, Issue 1). <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/280/>
- Mejía, T. M. A. (2017). *La seguridad alimentaria en Colombia : cambios y vulnerabilidades*.
- Montaño, A. N. M., Navarro, R. M. del C., Patricio, L. I. C., Chimal, S. E., & Miguel de la Cruz, J. (2018). El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? *CIENCIA Ergo Sum*, 25(3), 1–10. <https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9>

- Murillo, O., & Camacho, P. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas. In *Agronomía Costarricense* (Vol. 21, Issue 2).
- Núñez, P. J. L., Cristóbal, A. D., Acosta, E. H., & Villanueva, M. A. (2022). Effect of three production systems on the physical fertility status of the soil. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 55–81. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279>
- Ospina, M. R., & Paz, C. J. P. (2012). Características florísticas de un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) en la meseta de Popayán (Cauca). In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 10, Issue 2). Julio-Diciembre.
- Padilla, C., Crespo, G., & Sardiñas, Y. (2009). Degradación y recuperación de pastizales. In *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* (Vol. 43).
- Paricahua, C. M. (2021). *revista latinoamericana ogmios Mayo-agosto 2021 Vol. 1 Núm. 1 Editada por: Instituto de Investigación y Capacitación Profesional del Pacífico cambio climatico y desarrollo sostenible climate change and sustainable development.* <https://doi.org/10.53595/rlo.2021.1.008>
- Pinilla, M. C., & Pinzón, C. (2012). *Influencia del ciclo ENOS sobre la precipitación en los municipios de Betulia, San Vicente de Chucurí, Zapatoca y Girón, departamento de Santander, Colombia.*
- Ramos, D. A., Palacios, V. J. G., & Pinzón, F. O. P. (2020). Epiedaphic springtail diversity in *Acacia mangium* plantations and savannas in the Colombian Orinoquía. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91(4). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3276>
- Roque Ortiz Silla. (2015). *Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología.*

- Sardi, A., Torres, A. M., & Corredor, G. (2018). Floristic diversity in a rural landscape of the lower slope in Farallones of Cali, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2), 142–160. <https://doi.org/10.14483/2256201X.10866>
- Simijaca, D., Moncada, B., & Lücking, R. (2018). Oak forest or conifer plantation, what do epiphytic lichens prefer? *Colombia Forestal*, 21(2), 123–141. <https://doi.org/10.14483/2256201X.12575>
- Sousa, W. O., Serra, N. V. S., Dos Santos, G. B., Aranda, R., & Marques, M. I. (2022). Effects of hydrological cycles and water body connectivity on abundance and cooccurrence of two Neotropical Curculionidae species. *Biota Neotropica*, 22(1). <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2021-1249>
- Telles, A. R., Jiménez Pérez J, Alanís Rodríguez E, Aguirre Calderón OA, & Treviño Garza EJ. (2022). *Crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales: Un análisis del estado actual de las tendencias mundiales*.
- Tovar, Q. A. D. (2023). Servicios ecosistémicos del suelo en la producción de leche en Chitagá, Norte de Santander, Colombia. *Informador Técnico*, 87(1), 53–64. <https://doi.org/10.23850/22565035.5319>
- Úbeda, R. J. S., & Delgado, D. Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Vanolli, B. S., Pereira, A. P. A., Franco, A. L. C., & Cherubin, M. R. (2023). Edaphic and epigeic macrofauna responses to land use change in Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 117, 103514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103514>

- Vásquez, H. V., Valqui, L., Alegre, J. C., Gómez, C., & Maicelo, J. L. (2020). Analysis of four silvopastoral systems in Peru: Physical and nutritional characterization of pastures, floristic composition, carbon and CO₂ reserves. *Scientia Agropecuaria*, *11*(2), 167–176. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.03>
- Villa, P. M., Martins, S. V., de Oliveira Neto, S. N., Rodrigues, A. C., Hernández, E. P., & Kim, D.-G. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. *Forest Policy and Economics*, *118*, 102217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102217>
- Wang, S., Heal, K. V, Zhang, Q., Yu, Y., Tigabu, M., Huang, S., & Zhou, C. (2023). Soil microbial community, dissolved organic matter and nutrient cycling interactions change along an elevation gradient in subtropical China. *Journal of Environmental Management*, *345*, 118793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118793>
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricultural Water Management*, *232*, 106043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>
- Xiao, F., Wang, X., & Fu, C. (2023). Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *47*, 101422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101422>
- Yaguache, O. L. A. (2022). *Dialnet-HumedadYAlmacenamientoDeAguaEnElSueloEnCuatroTipos-8537296* (3).
- Zapata, A. P. C. (2019). Composition and structure of shade canopy in coffee agroforestry systems of three municipalities of cundinamarca, colombia. *Ciencia Florestal*, *29*(2), 685–697. <https://doi.org/10.5902/1980509827037>

Zhao, L., Wang, L., Liang, X., Wang, J., & Wu, F. (2013). Soil Surface Roughness Effects on Infiltration Process of a Cultivated Slopes on the Loess Plateau of China. *Water Resources Management*, 27(14), 4759–4771. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0428-7>