

Infiltración en suelos de uso forestal, ganadero y agrícola, análisis para la gestión hídrica en Málaga Santander - Colombia.

Infiltration in forestry, livestock and agricultural soils, analysis for water management in Málaga Santander - Colombia.

Lady Vanessa Hernández Saldaña ^a , Diego Alirio Meneses Padilla ^a , Mauricio Andrés Ruiz-Ochoa ^b , Ricardo Andrés Oviedo-Celis ^{a*} 

* Autor de correspondencia: ^aUniversidad Industrial de Santander, Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia, Programa Ingeniería Forestal, Málaga, Colombia, raovicel@correo.uis.edu.co

^b Unidades Tecnológicas de Santander, Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, Programa de Ingeniería Ambiental, Bucaramanga, Colombia.

RESUMEN

El suelo y las coberturas vegetales que soporta, son fuente importante de bienes y servicios ecosistémicos, sin embargo, el uso y aprovechamiento no sostenible de estos recursos naturales provoca impactos negativos que afectan procesos como la infiltración. Se analizó la capacidad de infiltración en cuatro usos del suelo típicos de la zona rural del municipio de Málaga Santander – Colombia. Se caracterizó la composición y estructura de la flora en un bosque, una plantación forestal, un sistema agroforestal, y en pastos, la capacidad de infiltración se midió por el método de doble anillo, en 15 repeticiones por uso del suelo, donde igualmente fueron extraídas muestras de suelo a 0,30 m de profundidad para análisis propiedades físicas. La cuantificación de la capacidad de infiltración se realizó por el modelo de *Kostiakov*, datos de campo sometidos a pruebas de ANOVA, Tukey ($P < 0,05$) y correlación de Pearson. Los resultados mostraron diferencias en composición y estructura de la flora, y los suelos se caracterizan por una densidad aparente, porosidad total y humedad no similares. La velocidad de infiltración no mostró diferencias entre bosque y plantación forestal. La infiltración básica se correlacionó directamente con la densidad aparente, porosidad total y humedad. Se concluyó, que el uso del suelo y algunas propiedades físicas influyen en la capacidad de infiltración, información que puede servir para que comunidades en sectores rurales de los andes de Colombia, definan acciones de gestión integral del recurso hídrico en sus territorios, a partir del conocimiento de las coberturas vegetales que implementan.

Palabras claves: agua del suelo, gestión de agua, ecosistemas altoandinos, subsuelo.

ABSTRACT

The soil and the vegetation cover it supports are an important source of ecosystem goods and services; however, the unsustainable use and exploitation of these natural resources cause negative impacts that affect processes such as infiltration. The study analyzes the infiltration capacity in four typical land uses of the rural area in the municipality of Málaga Santander - Colombia. The composition and structure of the flora in a forest, forest plantation, agroforestry system and pasture were characterized, the infiltration capacity was measured by the double ring method, in 15 replicates per soil use, where soil samples were also extracted at 0.30 m depth for physical properties analysis. The quantification of infiltration capacity was carried out by the *Kostiakov* model, field data were subjected to ANOVA, Tukey ($P < 0.05$) and Pearson correlation tests. The results showed differences in composition and structure of the flora, and the soils are characterized by a bulk density, total porosity and moisture not similar. The infiltration rate showed no differences between forest and forest plantation. Basic infiltration was directly correlated with bulk density, total porosity and humidity. It was concluded that soil use and some physical properties influence the infiltration capacity, information that can help communities in rural sectors of the Andes of Colombia to define actions for the integrated management of water resources in their territories, based on the knowledge of the vegetation cover that they implement.

Keywords: soil water, water management, high andean ecosystems, subsoil.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural necesario para el desarrollo y sustento de todas las formas de la vida, no obstante, el desarrollo de actividades antrópicas no sostenibles

compromete su conservación (Paricahua, 2021). Carpio y Taype (2021) reconocen que actividades agropecuarias y forestales no sostenibles implementadas en el suelo, promueven un desbalance de la base nutricional, compactación y desertificación del suelo, alcanzando en algunos casos la

degradación de este sistema natural. Por tanto, el funcionamiento del suelo solo es posible si los atributos físicos, químicos y biológicos que lo caracterizan interactúan de forma constante y natural, aún sobre un uso productivo. Colombia cuenta con 12 órdenes taxonómicos de suelos, muestra del diverso patrimonio edáfico en el país (Lince & Sadeghian, 2021). Sin embargo, esta riqueza edáfica según estudios de Villegas del Castillo (2021) para la región andina en Colombia, está en riesgo de afectación debido a la ausencia de planificación en los territorios, y la inadecuada utilización del suelo según la vocación del recurso natural, situación que acontece también a nivel global. De acuerdo con Vallejo-Quintero (2013), la mayoría de estos suelos tienen alta capacidad para la producción agrícola, forestal y ganadera, pero reportes del Serrato (2013) indican que son actividades que han causado alteraciones al suelo en algunas regiones de Colombia, por la inadecuada implementación aspecto sobre el cual aún se tienen vacíos de información por abordar.

Este contexto de uso y aprovechamiento del suelo, crea escenarios no favorables que alteran el funcionamiento de los procesos en la interfaz suelo, planta, atmósfera que comprometen la generación y aporte de servicios ecosistémicos edáficos necesarios para garantizar la calidad de los sistemas vivos. De este modo, implementar usos de suelo como agrícola, forestal comercial y ganadero, demanda a nivel global aumentar esfuerzos institucionales para generar informaciones que permitan comprender su impacto real en el suelo, y así, establecer acciones de gestión que contribuyan a la conservación del suelo, los ecosistemas terrestres y los demás recursos naturales en los territorios (Leyva et al., 2018). Los recursos hídricos del suelo son necesarios para las plantas y las coberturas vegetales que conforman, pero su disponibilidad, depende de la interacción entre las fases líquida y sólida del suelo (Yaguache, 2022). En tal sentido, al modificar el funcionamiento hídrico del suelo, se promueve déficit hídrico, bajas tasas de ciclaje de nutrientes, desbalance del ciclo hídrico, ausencia de biota edáfica y la inestabilidad mecánica, situación que compromete su capacidad para dar soporte y sustento de la vida, un problema no específico de países en Latinoamérica (Luna et al., 2012).

La infiltración es un subproceso del ciclo hidrológico que refleja el ingreso de agua atmosférica al suelo, influenciado por la configuración física del suelo; y la composición y estructura de la cobertura vegetal que soporta (Karin et al., 2019; Estrada et al., 2021). En tal sentido, la tasa de infiltración es una respuesta natural del suelo respecto del tipo de actividad productiva y/o manejo implementado. A su vez, una alteración de este patrón natural, afecta otros subprocesos del ciclo hidrológico como la escorrentía superficial cuyos valores altos implican alto riesgo de generar erosión del suelo, un problema frecuente en regiones tropicales (Zhao et al., 2013).

El municipio de Málaga Santander en los Andes de Sur América, se caracteriza por una matriz fragmentada del

paisaje resultado del historial de actividades rurales productivas implementadas. Esta localidad al nororiente de Colombia, presenta coberturas como bosques de *Quercus humboldtii*, pastos en mayor extensión, y algunas áreas dispersas en plantaciones forestales y sistemas agroforestales, de las cuales no se tiene claridad sobre su incidencia en la infiltración. Así, el objeto de este estudio, fue analizar el subproceso de infiltración en un contraste de características biofísicas de ecosistemas naturales y productivos comunes de Latinoamérica, para establecer un referente de gestión hídrica, ambiental y forestal en la región, replicable a otras latitudes que permita a comunidades rurales conocer y comprender el rol de las coberturas en sus fincas respecto de la regulación del agua.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se llevó a cabo en el municipio de Málaga, al sur oriente del departamento de Santander Colombia; localizado a 6°42'07" latitud norte y 72°43'56" longitud oeste, sobre 2.220 m.s.n.m. El clima del municipio es frío, con precipitación promedia anual de 1.400 mm distribuidos en los meses de marzo a mayo que concientran la primera época de lluvias, y una segunda época en los meses de octubre a noviembre, y la temperatura media anual oscila en un rango de 17,0 a 18,1 °C. Presenta relieve quebrado a ondulado con pendientes entre el 25 al 50%, los suelos se caracterizan por predominio materiales de origen ígneo, con profundidad efectiva y fertilidad moderada susceptibles a procesos de erosión donde en su mayoría se desarrollan de actividades productivas agropecuarias (CORPOICA, 1997; CONIF, 2007) (Figura 1).

Caracterización florística usos del suelo. Los datos de campo se colectaron en las veredas Buenavista, Pescaderito y Guásimo, ubicadas en la parte alta, media y baja del municipio, donde fueron seleccionados cuatro usos de suelo: un área en bosque natural de *Quercus humboldtii*, ubicada en suelos de relieve ondulado con pendientes entre 10 a 50% en la vereda Pescaderito sobre 2.921 m s.n.m., este bosque se encuentra delimitado como área de conservación donde no se ha realizado ningún tipo de intervención silvicultural o antrópica. Un área en plantación forestal de *Pinus patula* ubicada en la vereda Buenavista sobre 2.800 m s.n.m. en suelos con pendientes del 10 al 30%, la plantación presentó una densidad de siembra al momento del estudio de 600 árboles ha⁻¹ y 14 años de establecida donde se han realizado intervenciones silviculturales como podas de formación y raleos. Un área semi-tecnificada de pastos ubicada también en la vereda Buenavista sobre 2.737 m s.n.m. en suelos de relieve plano, y cuyo historial de establecimiento es mayor a 40 años, para el momento del estudio contaba con presencia de 5 semovientes en pastoreo, y finalmente un sistema agroforestal ubicado en la vereda Guásimo sobre 1.916 m s.n.m. establecido en suelos de relieve plano con Café (*Coffea arabica*) y maderables hace

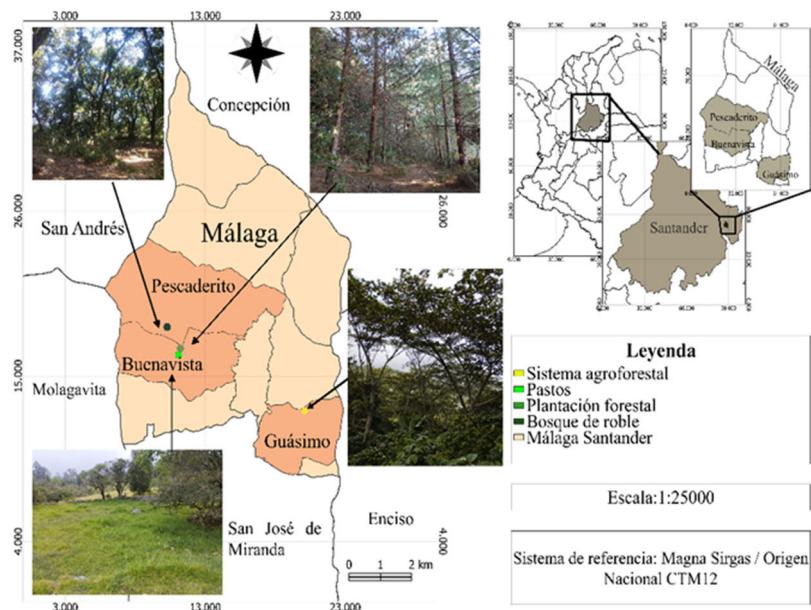


Figura 1. Área de estudio, localización puntos de muestreo usos del suelo seleccionados Municipio de Málaga Santander – Colombia.
Study area, location of sampling points selected land uses Municipality of Málaga Santander – Colombia.

10 años, y donde no se realiza ningún tipo de manejo tecnificado.

La composición y estructura florística se determinó así: para bosque y sistema agroforestal se registró la 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 Colombia. 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, así como los individuos arbóreos. Finalmente, para la plantación forestal no se establecieron parcelas por tratarse de un monocultivo de la especie *P. patula*, en todos los casos se colectaron datos de altura y distancia entre individuos sobre un transecto de 50 m a partir del cual fueron elaborados los perfiles de vegetación.

Cálculo capacidad de infiltración. La capacidad de infiltración se obtuvo por el método de doble anillo (Sepúlveda, 1999). Para el estudio se realizaron 15 repeticiones de la prueba de infiltración, ubicando los anillos en una parte plana de cada uso del suelo y de forma aleatoria Zeng et al. (2022), para un total de 60 mediciones, con un mínimo de distanciamiento entre repeticiones de 1,5 m, esto para cubrir la variabilidad espacial del terreno. Se empleó un anillo de 0,53 y otro 0,28 m de diámetro, introducidos al suelo a una profundidad de 0,10 m. En el anillo de menor diámetro, se colocó un plástico para evitar el impacto directo del agua en el suelo, y el taponamiento de poros. Éste fue llenado inicialmente hasta una altura de 0,10 m para luego retirar el plástico, momento a partir del cual se inició

el registro de tiempos en intervalos de un minuto hasta los primeros 5 minutos, posteriormente, se incrementó a cinco minutos hasta los treinta minutos, y finalmente en intervalos de 10 minutos hasta completar una hora.

El estudio del suelo se realizó mediante análisis de siete propiedades físicas (Tabla 1), para lo cual fueron extraídas 15 muestras por uso del suelo como lo sugiere Lopes et al. (2020). Las muestras extraídas fueron simples tomadas a 0,30 m de profundidad con barreno de tornillo previo al inicio de la prueba de infiltración, y a un metro de distancia del perímetro del anillo de diámetro mayor para lograr variabilidad en los análisis físicos del suelo. La clase textural se obtuvo por el método de Bouyoucos, para la densidad aparente se emplearon cilindros metálicos de volumen conocido, la densidad real se determinó por el método de picnómetro, los valores de temperatura y humedad se obtuvieron por lectura directa en campo empleando un Sensor GS3, la porosidad total se halló como la relación entre la densidad aparente y real (Wu et al., 2016), y por último para el potencial mátrico se empleó un Irrometer Tensiometer 0-100 kPa. Las muestras colectadas en campo fueron tamizadas en malla de 2 mm, para posterior análisis físico en el laboratorio de química de la Universidad Industrial de Santander Sede Málaga.

Análisis y procesamiento de datos. La capacidad de infiltración se determinó según Kostiakov, modelo sugerido por Kunst et al. (2003) y Mao et al. (2024) para estudios donde se busca contrastar la infiltración entre usos del suelo, dentro de sus bondades se destaca el ajuste la eficiencia y la relación de variables físicas del suelo con el ingreso del agua

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo analizadas.

Physical properties of the soil analyzed.

Propiedad	Unidad	Método	Profundidad (m)
Textura (T)	%	Bouyoucos	0,30
Densidad aparente (Da)	g cm ⁻³	Cilindro metálico	0,07
Densidad real (Dr)	g cm ⁻³	Picnómetro	0,30
Porosidad total (Pt)	%	Relación Da / Dr	0,30
Humedad del suelo	%	Sensor GS3	0,30
Temperatura	°C	Sensor GS3	0,30
Potencial mátrico	kPa	Tensiómetro Irrrometer	0,30

al mismo. Inicialmente se cuantificó la velocidad de infiltración, a partir de la relación entre el espesor de la lámina de agua que ingresa, y el tiempo que tarda en hacerlo [1].

$$I = at^b \quad [1]$$

donde, I es la velocidad de infiltración, expresada en cm/min, t es el tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos, a es el coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial del tiempo, y b corresponde al exponente adimensional que varía de acuerdo con las características del suelo entre 0 y -1.

Luego se cuantificó la infiltración acumulada (I_{cum}) como la cantidad de agua que pude almacenar un suelo en un límite de tiempo determinado, es decir, representa la integración de la velocidad de infiltración en el tiempo [2]

$$I_{cum} = \sum_0^t at^b * dt \quad [2]$$

Finalmente se obtuvo la infiltración básica (I_b), como expresión de velocidad constante durante el intervalo de tiempo que tardo cada prueba de campo [3].

$$I_b = a(-10b)^b \quad [3]$$

donde, I_b es la infiltración básica, a se deduce de la ecuación infiltración acumulada, b se deduce de la ecuación infiltración acumulada, y b es el exponente de velocidad de infiltración del suelo.

Los registros generados del trabajo de campo y análisis de laboratorio, fueron procesados mediante técnicas estadísticas descriptivas, para conocer su comportamiento respecto de la media para cada una de las variables. Luego, fueron aplicadas técnicas de análisis multivariado como análisis de varianza de un factor, para establecer niveles de significancia ($P < 0,05$). En este caso, la comparación de medias permitió comprobar o rechazar las hipótesis:

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

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

Para identificar similitudes entre usos del suelo y las variables edáficas, se aplicó una prueba de Tukey a los resultados y, por último, correlación de Pearson para establecer el grado de relación de las variables del suelo respecto de la infiltración básica estimada. El procesamiento estadístico y generación de gráficos se realizó en el software Rstudio®.

RESULTADOS

Caracterización florística usos del suelo. Se identificaron siete especies arbóreas en el sistema agroforestal *Thrichanthera gigantea*, *Albizia carbonaria*, *Inga edulis*, *Persea americana* y *Ochroma pyramidale*. Su uso en las fincas de la zona se debe a las bondades que tienen como sombra para el sistema productivo, así como, su alto grado de adaptabilidad. La mayor abundancia la registró *A. carbonaria* con el 17,9% de los individuos, seguido de *T. gigantea* e *I. edulis* con 16,4% y 14,9% respectivamente, que conformaron el estrato superior del modelo agroforestal, también, se identificaron algunos individuos dispersos de *Musa x paradisiaca* empleados como sombra transitoria (Figura 2).

En el suelo destinado a pastos se identificaron gramíneas como *Pennisetum clandestinum*, *Trifolium pratense* y *Holcus lanatus* cuyo desarrollo de altura oscilo los 0,50 y 0,60 m. De igual forma, fueron identificados algunos individuos arbóreos dispersos de *Fraxinus uhdei*, *Hesperocyparis lusitanica*, *Escallonia pendula* y *Acacia melanoxylon* con alturas entre 10 a 25 m (Figura 2). Finalmente, la plantación forestal se caracterizó por un solo estrato arbóreo cuya altura promedio fue 20 m (Figura 2).

El Bosque, registró tres especies arbóreas entre las cuales *Q. humboldtii* con el 92,4% se destaca como abundante e importante, *Clusia multiflora* con el 3,8% y *Weinmannia tomentosa* con 2,5%, fueron las menos abundantes, un patrón característico de estos bosques en los andes de América 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 re-

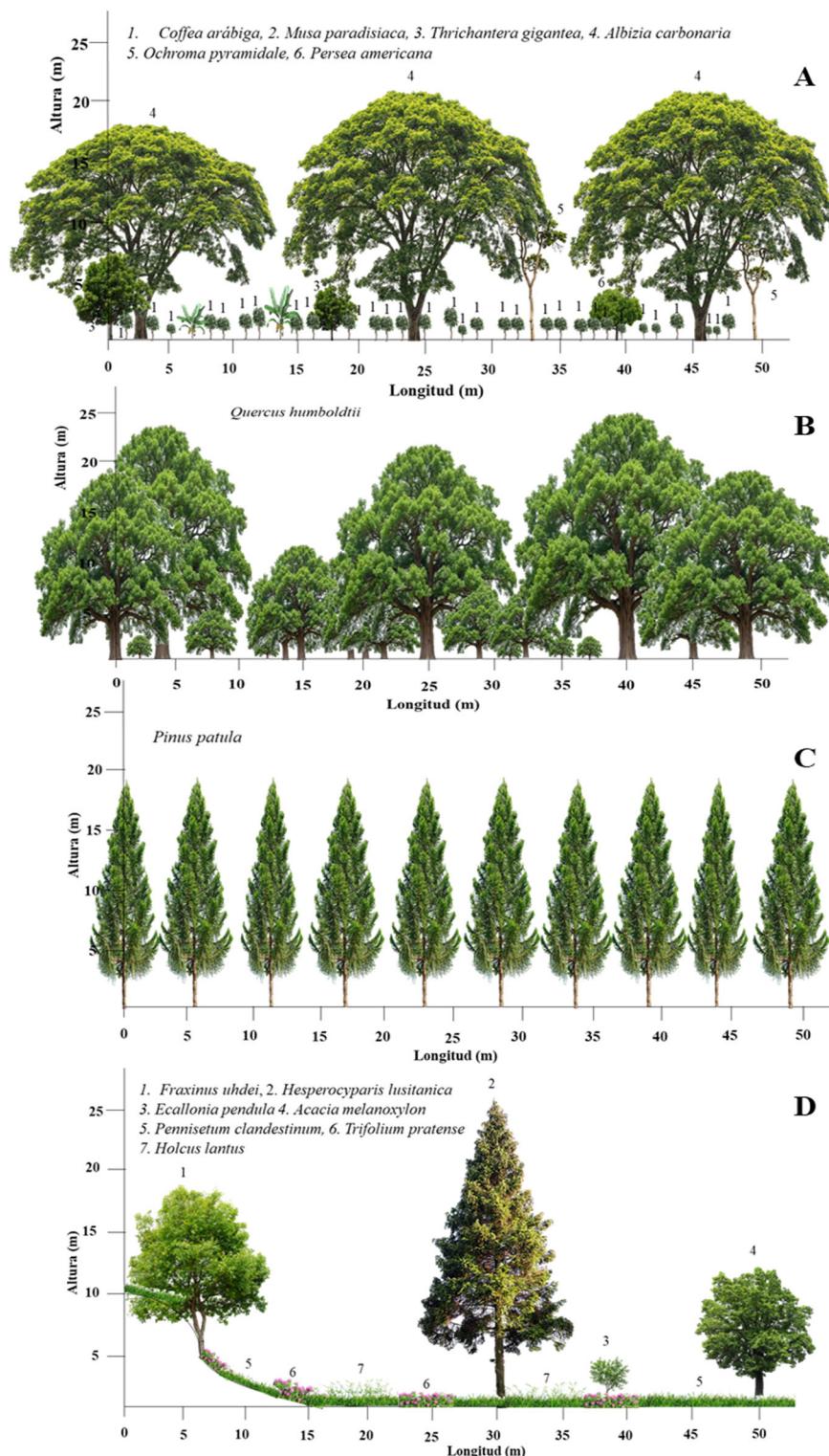


Figura 2. Estructura florística usos del suelo. (A) Sistema agroforestal, (B) Bosque *Quercus humboldtii*, (C) Plantación forestal y (D) Pastos municipio de Málaga Santander – Colombia.

Floristic structure land uses. (A) Agroforestry System, (B) *Quercus humboldtii* Forest, (C) Forest plantation and (D) Pastures municipality of Málaga Santander – Colombia.

gistraron un distanciamiento promedio de 5 m con alturas entre 5 a 25 m (Figura 2).

Caracterización física del suelo. La clase textural en los cuatro usos del suelo fue Franco Arenosa (FA), y refleja el equilibrio en la fracción sólida mineral que conforma los suelos en el municipio de Málaga. De igual forma, este resultado evidencia un estado ideal del sistema suelo como soporte de coberturas naturales y artificiales, aspecto que impacta igualmente procesos y dinámicas químicas y biológicas en un escenario de conservación natural del recurso suelo. La prueba de Tukey arrojó diferencias significativas ($P < 0,05$) para densidad aparente, porosidad total y humedad en los cuatro usos de suelo (Tabla 2). Para el caso de la plantación forestal y boque se obtuvo igualdad en densidad aparente, en el sistema agroforestal y pastos esta propiedad se mostró como diferente. En el caso de la densidad real, no hubo diferencias significativas en pastos, plantación forestal y sistema agroforestal. Por último, la porosidad total y humedad arrojaron igualdad en bosque y plantación forestal y sistema agroforestal con pastos. La temperatura y potencial mátrico, no mostraron diferencias significativas ($P < 0,05$) en los cuatro usos del suelo.

Velocidad de infiltración para cada uso del suelo. 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 plantación forestal y bosque, contrario a suelos con pastos y sistema agroforestal, donde los resultados representaron una disminución entre el 19% y 25% de la velocidad de infiltración. Transcurridos 45 minutos de iniciado el ensayo, se presentó el cambio más drástico en la línea de velocidad para los cuatro usos. La plantación forestal pasó de $68,6 \text{ mm min}^{-1}$ a $6,05 \text{ mm min}^{-1}$, en el caso del bosque este cambio representó 90,3%, en pastos fue del 91,7% y para sistema agroforestal del 92,6% (Figura 3).

De acuerdo con lo anterior, la velocidad de infiltración se estabilizó primero en el bosque y plantación forestal, con diferencia de 27 minutos a partir del minuto 249. Esto, equivale a una velocidad en bosque de $4,7 \text{ mm min}^{-1}$, y

en la plantación forestal de $3,3 \text{ mm min}^{-1}$. En el caso del sistema agroforestal, el proceso de estabilización se dio en el minuto 288 con una velocidad de $1,1 \text{ mm min}^{-1}$. El pasto fue el uso del suelo donde menor velocidad de infiltración se obtuvo con $0,3 \text{ mm min}^{-1}$, a los 340 minutos de iniciada la prueba en campo. Por último, los resultados mostraron como el modelo de Kostiakov se ajustó mejor a la plantación forestal y bosque respecto de la velocidad de infiltración.

Infiltración acumulada por uso del suelo. 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 bosque y plantación forestal hasta el minuto 30, y partir de este tiempo, la variable se comportó diferente hasta el final de la prueba. Para el caso del bosque, este alcanzó a los 500 minutos el máximo de agua acumulada con 8,621 mm, y la plantación forestal en este mismo tiempo registró 7,035 mm, valores que según la precisión estimada no se consideran diferentes. Los dos usos restantes, no presentaron un referente de tiempo similar durante el desarrollo de la prueba. Para el sistema agroforestal, se obtuvo a los 250 minutos un valor de 914 mm, y finalizada la prueba este uso arrojó un valor de 1,400 mm. El pasto, 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 sistema agroforestal que aumentó a 379 mm al cierre de la prueba de campo (Figura 3).

Infiltración básica. 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 del 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 bosque y plantación forestal.

Relación capacidad infiltración y atributos físicos del suelo. La capacidad de infiltración de los cuatro usos del suelo, mostró mayor incidencia respecto de la porosidad

Tabla 2. Comparación de medias propiedades físicas de suelos analizados en el municipio de Málaga – Santander Colombia.

Comparison of average physical properties of soils analyzed in the municipality of Málaga – Santander Colombia.

Uso del suelo	Densidad aparente (g cm^{-3})	Densidad real (g cm^{-3})	Porosidad total (%)	Humedad (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Potencial mátrico (kPa)
Plantación forestal	$0,84 \pm 0,22$ c	$2,63 \pm 0,03$ a	$65,27 \pm 7,83$ a	$9,40 \pm 9,13$ b	$20,89 \pm 6,85$ a	$28,28 \pm 11,77$ a
B. <i>Q.humboldtii</i>	$0,75 \pm 0,05$ c	$1,57 \pm 0,37$ b	$68,16 \pm 7,32$ a	$6,95 \pm 3,88$ b	$20,8 \pm 2,91$ a	$25,81 \pm 9,29$ a
Pastos	$2,01 \pm 0,33$ a	$2,64 \pm 0,03$ a	$45,51 \pm 8,10$ b	$25,06 \pm 13,71$ a	$22,11 \pm 3,91$ a	$23,54 \pm 10,99$ a
Sistema agroforestal	$1,56 \pm 0,07$ b	$2,55 \pm 0,11$ a	$50,19 \pm 2,58$ b	$26,23 \pm 6,93$ a	$21,09 \pm 2,35$ a	$28,41 \pm 3,64$ a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas Prueba de Tukey ($P < 0,05$).
Different letters in the same row indicate significant differences Tukey test ($P < 0,05$).

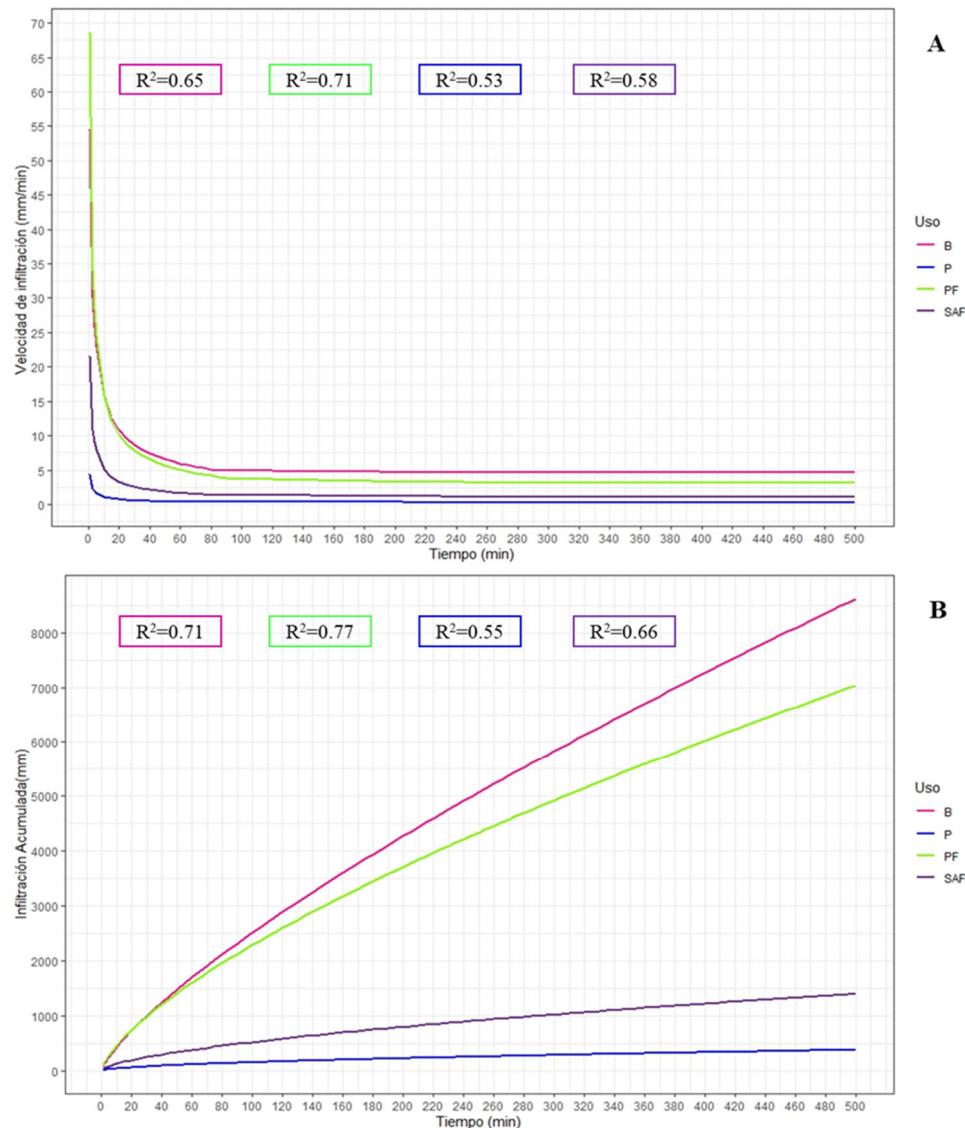


Figura 3. Curvas de velocidad de infiltración (A) y curvas de infiltración acumulada (B) según uso del suelo. (P) Pastos, (PF) plantación forestal, (SAF) sistema agroforestal y (B) Bosque.

Infiltration speed curves (A) and cumulative infiltration curves (B) according to land use (SAF) Agroforestry System, (B) *Q. humboldtii* Forest, (C) Forest plantation and, (D) Pastures.

total, densidad aparente y humedad. La porosidad total, en la plantación forestal y el bosque fueron los usos del suelo donde se presentó la relación más fuerte (Figura 4). En pastos y sistema agroforestal, la relación fue igualmente positiva y fuerte. Se destaca la relación fuerte pero inversa que presenta la humedad en los cuatro usos del suelo. Sin embargo, el bosque obtuvo el valor más alto, y el valor mínimo se presentó en pastos. En el caso de la densidad aparente, también se tienen valores de correlación fuerte e inversos, siendo el bosque donde se obtuvo el valor más alto. Los restantes usos del suelo estudiados también presentaron correlación muy alta e inversa, tal como se aprecia en la Figura 4.

DISCUSIÓN

Como era de esperarse, los cuatro usos del suelo estudiados fueron diferentes en estructura y composición florística. El sistema agroforestal, presentó dos estratos conformados a partir de tres especies de enfoque productivo agrícola y cuatro forestales, resultados que difieren de los obtenidos por Zapata (2019) en la región central andina de Colombia, al comparar tres modelos agroforestales de café con maderables, que presentaron tres estratos y una composición de 43 especies arbóreas. Situación similar reportada en otros países de Latinoamérica como México por Román et al. (2016) donde estos sistemas de uso del suelo

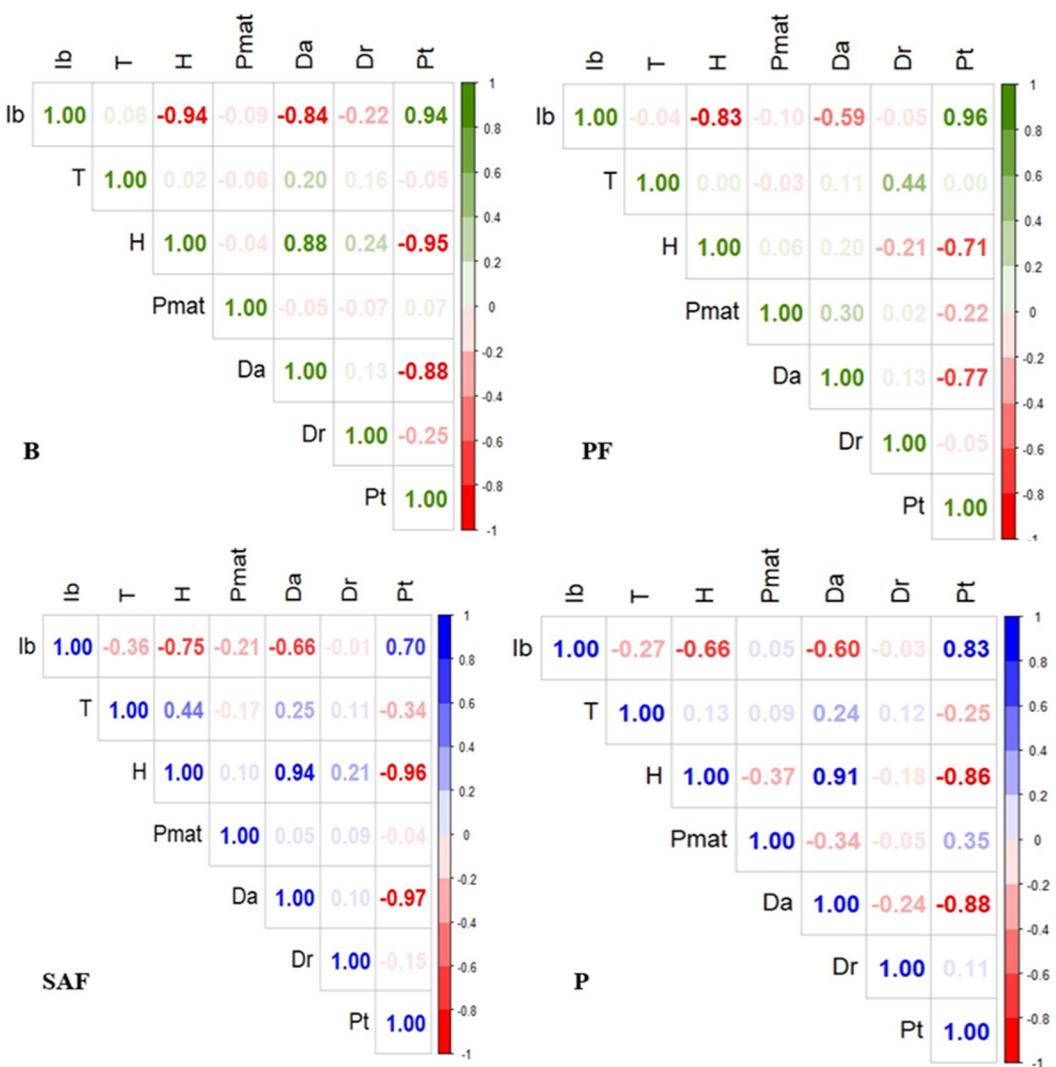


Figura 4. Correlograma de infiltración básica y variables edáficas en bosque (B), plantación forestal (PF), pastos (P) y sistema agroforestal (SAF), donde se muestra el tipo y la fuerza de la relación entre las distintas variables de estudio.

Correlogram of basic infiltration and soil variables in forest (B), forest plantation (PF), pastures (P) and agroforestry system (SAF), showing the type and strength of the relationship between the different study variables.

se conforman a partir de especies maderables, forrajeras y medicinales que dan una configuración de estructura más compleja. La presencia de tres estratos en el Bosque, dominados por la especie *Q. humboldtii* difiere de estudios adelantados por Ospina y Paz (2012) en la región andina del Cauca, donde reportan 51 especies forestales, un patrón de diversidad mayor que refleja el estado crítico de los ecosistemas forestales naturales en Málaga, producto de la expansión agrícola y ganadera, un problema que Aristizabal y Hermelin (2008) mencionan requiere abordajes desde enfoques socio-económicos para solucionarlo a escala local.

La plantación forestal, fue el uso del suelo de menor complejidad florística por su carácter de monocultivo, característica que no resta importancia a sus funciones como cobertura del suelo, aspecto que concuerda con Sánchez-

Londoño et al. (2021) quienes destacan la contribución de su implementación en sectores rurales para la conservación del suelo, y como hábitat para especies de flora y fauna amenazadas. Para este cultivo, el manejo silvicultural implementado se destaca como importante, algo que Castellanos et al. (2008) reconocen necesario en cultivos forestales comerciales. El área destinada a ganadería presentó composición y estructura florística similar a la reportada por Vásquez et al. (2020), quienes identificaron árboles de *H. lusitanica* y *A. melanoxylon* en fincas ganaderas del Perú asociadas con *P. clandestinum* como las identificadas en la zona de estudio, resultados que evidencian la baja transición hacia modelos pecuarios integrales que integren arreglos silvopastoriles como alternativas de producción pecuaria y forestal.

Por su parte, las variables edáficas analizadas en el estudio mostraron diferencias entre los usos seleccionados, resultados que concuerdan con Nuñez 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 específicamente en aquellas propiedades relacionadas con la mecánica del suelo, aspecto que Sandoval-Moreno y Günther (2008) identifican como estratégico para ser tratado con propietarios de las fincas y mostrar como las prácticas de manejo en los sistemas productivos pueden incidir en la gestión hídrica local. Situación igualmente validada por Neris et al. (2012) quienes ratifican la influencia de la conversión de suelos forestales a usos agropecuarios en propiedades como la densidad aparente, con implicaciones negativas en las tasas de infiltración de agua en el suelo. Este estudio demostró como las coberturas presentes en los cuatro usos del suelo en Málaga Santander, inciden las características de la infiltración hallazgo igualmente informado por Liu et al. (2018) quienes atribuyen estas diferencias a cambios en la física del suelo como fue acá informado.

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 sistema agroforestal y pastos. 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, estudios realizados por Gómez et al. (2014) y Garate et al. (2022) concuerda con los resultados obtenidos, al indicar que las tierras de pastoreo presentan menor tasa de infiltración. En este mismo sentido, los hallazgos acá reportados concuerdan con Lopes et al. (2020) quienes indican que una alta velocidad de infiltración es producto de una mayor cantidad de hojarasca y materia orgánica aportada por usos del suelo arbóreos, donde también los complejos sistemas radiculares inciden en la cantidad de macroporos del suelo. La capacidad de infiltración para los cuatro usos del suelo fue diferente, siendo más baja en usos de suelo agrícola y pecuario; valores afectados negativamente por la densidad aparente y la porosidad total del suelo, información que coincide con la obtenida por Sandoval et al. (2021) para quienes la infiltración más baja se presenta en estas actividades productivas agrícolas y pecuarias, donde la densidad aparente y porosidad total presentaron valores críticos de compactación.

El bosque de *Q. humboldtii* fue el uso del suelo con mayor capacidad de regulación hídrica, debido a que alcanzo una estabilidad en la tasa de infiltración en el menor tiempo, en comparación con suelos destinados a la ganadería y agricultura, resultado que coincide con García-Leoz et al. (2018) y Lozano-Trejo et al. (2020) para quienes las coberturas boscosas son un elemento natural que tienen mayor potencial para mantener la disponibilidad de agua, y por ende favorece el aporte de servicios ecosistémicos

para las comunidades rurales y urbanas que los demandan. En tal sentido, cada resultado generado muestra la realidad ambiental del agua, más allá de la infiltración, y visualiza como cada elemento del paisaje rural en la región de estudio debe ser tratado desde la sinergia natural que crea su presencia.

CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que la composición y estructura florística de las coberturas, son características asociadas a los subprocesos del ciclo hidrológico como la infiltración. Un referente inicial que el estudio visualiza para ciertos ecosistemas naturales y productivos del municipio de Málaga en Santander Colombia. En tal sentido, las informaciones acá aportadas no solo son un punto de partida cuantitativo de la infiltración, por el contrario, contribuyen a la comprensión de la gestión del agua desde un enfoque integral que abarca el conocimiento de la cobertura por parte de las comunidades campesinas. Por tanto, se hace necesario promover el estudio de las coberturas vegetales, el ciclo hidrológico y los subprocesos como la infiltración, en otros usos del suelo y ecosistemas a nivel nacional, regional y global, de tal forma, que se tenga claridad sobre la infiltración como insumo de gestión y planificación hídrica. Al respecto, algunas de las coberturas acá estudiadas requieren un entendimiento diferente según el contexto geográfico, tal es el caso de las plantaciones forestales de *Pinus* sp., que para el caso de Colombia es una especie introducida de enfoque comercial, pero que en otras latitudes hacia el norte y sur del planeta se presenta como masas forestales nativas.

Las informaciones aportadas por el estudio, reflejan como la relación suelo y actividades productivas agropecuarias, demandan acciones orientadas a mejorar las prácticas de manejo que mitiguen la alteración de las propiedades físicas del suelo, lo anterior, por ser los usos donde se evidenció la menor capacidad de infiltración, condición que promueve exceso de escorrentía superficial y hace susceptible el suelo a la erosión. En este sentido, el bosque de *Q. humboldtii* y la plantación forestal se proyectan como dos usos del suelo que favorecen la regulación hídrica en la interfaz atmósfera, suelo, planta, no obstante, se trata de resultados para la región tropical, por tanto, es fundamental explorar estas investigaciones en bosques de zonas templadas y boreales donde aspectos como la estacionalidad climática, y la evolución pedogenética del suelo pueden generar otros patrones de contrastes sobre los acá presentados. Finalmente, es necesario incentivar entre las comunidades campesinas la conservación del suelo y los ecosistemas naturales de forma sincrónica al establecimiento de sistemas productivos, de tal forma, que la gestión hídrica local, el uso sostenible del suelo, y el desarrollo de actividades productivas económicas como la forestal, se conviertan en escenarios que aporten bienes y servicios ecosistémicos asociados a la dinámica hídrica global.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

HS-L y MP-D realizó la recopilación de datos de campo, analizó los resultados y preparó el primer borrador. RO-M y OC-R diseñó el estudio, revisión y escritura de versión final del documento.

FINANCIAMIENTO

El desarrollo y ejecución del estudio, no recibió ningún tipo de financiamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los propietarios de las fincas en el municipio de Málaga Santander Colombia, por su disposición para los trabajos de campo y montaje del ensayo.

REFERENCIAS

- Aristizabal, A & Hermelin, M. (2008). Los caminos de ganado en las tierras altas del departamento de Antioquia: Una primera aproximación. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 24: 55-71.
- Avella, A. (2016). Los bosques de robles (fagáceas) en Colombia: composición florística, estructura, diversidad y conservación. Bogotá, Colombia.
- Béjar, S., Cantú, I., Yáñez, M., & Luna, E. (2021). Evaluación y predicción de la infiltración en un Andosol bajo diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7): 1171-1183. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2327>
- Bermejo, L., García, A., & Soler, L. (2021). Influencia de la vegetación en la conductividad hidráulica en tres tipos de coberturas forestales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(2): 52-60.
- Carpio, L & Taype, I. (2021). Multitemporal analysis of plant associations and land use changes in a high andean locality, Puno-Peru. *Uniciencia*, 35(2): 1-19. DOI: <https://doi.org/10.15359/RU.35-2.3>
- CONIF (Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal). (2007). Zonificación Forestal para el Departamento de Santander – Colombia. 121p.
- CORPOICA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). (1995). Caracterización biofísica y socioeconómica de la provincia de García Rovira. 151p.
- 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). DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2021.51481>
- Garate-Quispe, J., Bejar, N., Pillco, N., Herrera-Machaca, M., & Dueñas, H. (2022). Diferencias en la capacidad de infiltración del suelo en dos tipos de cobertura vegetal en la amazonía peruana. *Folia Amazónica*, 31(2): 227-241. DOI: <http://dx.doi.org/10.24841/fa.v31i2.578>
- García-Leoz, V., Villegas, J., Suescún, D., Flórez, C., Merino, M., Betancur, T., & León, J. (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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Gómez, G., Munive, R., Mallma, T., & Orihuela, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes De Ciencia & Sociedad*, 4(1). DOI: <https://doi.org/10.18259/acs.2014004>
- Karlin, M., Salazar, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., & Acietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración En el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 37(2): 196-208.
- Kunst, C., Ledesma, R., Basan, N., Angella, M., Prieto, G., & Godoy, J. (2003). Rolado de ‘fachinales’ e infiltración de agua en suelo en el Chaco Occidental (Argentina). *RIA*, 32(3), 105-126.
- Lopes, V., Cardoso, I., Fernandes, O., Rocha, G., Bello, F., Moura, W., Santana, F., Veloso, G., & Rodríguez, J. (2020). The establishment of a secondary forest in a degraded pasture to improve hydraulic properties of the soil. *Soil & Tillage Research*, 198: 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104538>
- Leyva, S., Aime, B., & Reyes, M. (2018). Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1): 36-47. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.81>
- Lince, L., & Sadeghian, S. (2021). Taxonomía de suelos. Consideraciones para la zona cafetera de Colombia. *Boletín Técnico Cenicafe*, 45: 1-31. DOI: <https://doi.org/10.38141/10781/045>
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M., Castañeda-Hidalgo, H., Díaz-Zorrilla, G., & Santiago-Martínez, G. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1): 57-66. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>
- Luna, W., Estrada, H., Jiménez, M., & Pinzón, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4): 343-353.
- Liu, Z., Ma, D., Hu, W., & Li, X. (2018). Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls. *Soil & Tillage Research*, 178: 139-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.001>
- Mao, W., Zhu, Y., Huang, S., Han, X., Sun, G., Ye, M., & Yang, J. (2024). Assessment of spatial and temporal seepage losses in large canal systems under current and future water-saving conditions: A case study in the Hetao Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*, 291, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108615>
- Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G., & Tejedor, M. (2012). Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena*, 98: 55-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.006>
- Nuñez, J., Cristóbal, D., Hernández, E., & Villanueva, A. (2022). Effect of three production systems on the physical fertility status of the soil. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 55-81. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1279>
- Ospina, R., & Paz, J. (2012). Características florísticas de un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) en la meseta de Popayán (Cauca). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agro-industrial*, 10(2): 243-248.

- Paricahua, M. (2021). Cambio climático y desarrollo sostenible. *Revista Latinoamericana Ogmios*, 1(1):82-90. DOI: <https://doi.org/10.53595/rlo.2021.1.008>
- Román, M., Mora, A., & González, G. (2016). Sistemas agroforestales con especies de importancia maderable y no maderable, en el trópico seco de México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 20(2): 53:69.
- Sandoval, C., Cantú, I., González, H., Yáñez, M., Marmolejo, J., & Gómez, M. (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. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982>
- Sandoval-Moreno, A., & Günther, M. (2008). La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: Otros acercamientos a la sustentabilidad. *Ra Ximhai*, 9(2): 165-179.
- Sardi, A., Torres, M., & Corredor, G. (2018). Diversidad florística en un paisaje rural del piedemonte de los farallones de Cali, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2): 142-160. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.10866>
- Sepúlveda, R. (1999). El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. *Baetica*, 21: 9-33. DOI: <https://doi.org/10.24310/BAETICA.1999.v0i21.480>
- Serrato, M. (2013). Mal uso del suelo en Colombia ocasiona problemas socioeconómicos. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 4(2): 66-80. DOI: <https://doi.org/10.22579/22484817.624>
- Vallejo-Quintero, V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1): 83-99.
- Vásquez, H., Valqui, L., Alegre, J., Gómez, C., & Maicelo, J. (2020). Análisis de cuatro sistemas silvopastoriles en Perú: Caracterización física y nutricional de pasturas, composición florística, reserva de carbono y CO₂. *Scientia Agropecuaria*, 11(2): 167-176. DOI: <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.03>
- Villegas del Castillo, C. (2021). El ordenamiento del suelo rural en Colombia. Bogotá, Colombia. Cider. 15 p.
- Wu, G., Yang, Z., Cui, Z., Liu, Y., Fang, N., & Shi, Z. (2016). Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *Journal of Hydrology*, 535: 54-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127893>
- Yaguache, L. (2022). Humedad y almacenamiento de agua en el suelo en cuatro tipos de cobertura vegetal. *Ciencias Agrarias*, 15(1): 19-24.
- Zapata, P. (2019). Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciencia Florestal*, 29(2): 685-697. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827037>
- Zeng, C., Ze, H., Yu-Bin, W., Jia-Xin, Q., & Gao-Lin, W. (2022). Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area. *Journal of Hydrology*, 610: 1:9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127893>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0428-7>

Recibido: 25.11.2024

Aceptado: 01.06.2025

