

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**



**EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN DOS SISTEMAS DE USO
DE SUELO EN EL SECTOR VISTA ALEGRE, SUPTE**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

DIANA ANTUANE TORRES QUISPE

Tingo Maria – Perú

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°099-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 10 de noviembre de 2023, a horas 06:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN DOS SISTEMAS DE USO DE SUELO EN EL SECTOR VISTA ALEGRE, SUPTE”

Presentado por la Bachiller: **TORRES QUISPE, DIANA ANTUANE**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 16 de noviembre de 2023

Dr. JOSÉ DOLORES LÉVANO CRISÓSTOMO
PRESIDENTE

Dr. SEGUNDO CLEMENTE RODRIGUEZ DELGADO
MIEMBRO

Ing. M. Sc. DAVID P. QUISPE JANAMPA
MIEMBRO

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
ASESOR

Ing. M. Sc. ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA
ASESOR





"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 317 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN DOS SISTEMAS DE USO DE SUELO EN EL SECTOR VISTA ALEGRE, SUPTÉ	DIANA ANTUANE TORRES QUISPE	10 % Diez

Tingo María, 24 de noviembre de 2023


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomás Menacho Mallqui
DIRECTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN DOS SISTEMAS DE USO
DE SUELO EN EL SECTOR VISTA ALEGRE, SUPTE

Autor	: Bach. Diana Antuane Torres Quispe
Asesor	: Dr. Manrique de Lara Suarez Lucio
	: Ing. M.Sc. Alberto Franco Cerna Cueva
Programa de investigación	: Ciencias Básicas
Línea de investigación	: Climatología
Eje temático	: Influencia del clima en el hombre, suelo y agua.
Lugar de ejecución	: Supte San Jorge
Duración	: 6 meses.
Financiamiento	: S/. 4 251,50.

Tingo María – Perú

2023

DEDICATORIA

A mi abuela Catalina Ore Espinoza, por siempre estar a mi lado y guiarme con sus enseñanzas y ser mi inspiración en superarme.

AGRADECIMIENTO.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por ser mi alma mater, por permitirme compartir en sus aulas, la satisfacción de conocer amistades en los compañeros y docentes, que me enseñaron con sus experiencias.

Al Dr. Lucio Manrique de Lara Suarez, por su enseñanzas y paciencia y aporte en la investigación y su enseñanza profesional.

Al Ing. M.Sc. Alberto Franco Cerna Cueva, por su apoyo en el procesamiento de datos y asesoramiento constante

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis.....	2
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. Infiltración.....	3
2.1.2. Factores que afectan la infiltración.....	3
2.1.3. Métodos para medir la infiltración.....	8
2.1.4. Modelos de infiltración.....	10
2.1.5. Suelos de cultivo de coco (<i>Cocos nucifera L.</i>).....	12
2.1.6. Suelo de bosque natural.....	13
2.2. Antecedentes.....	14
2.2.1. Internacionales.....	14
2.2.2. Nacionales.....	16
2.2.3. Locales.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1. Lugar de ejecución.....	19
3.1.1. Ubicación política.....	19
3.1.2. Ubicación geográfica.....	19
3.1.3. Descripción de la zona de estudio.....	20
3.2. Criterio de investigación.....	21
3.2.1. Tipo de investigación.....	21
3.2.2. Diseño de investigación.....	21
3.2.3. Variables de investigación.....	22
3.2.4. Muestra.....	22
3.3. Materiales y equipos.....	23
3.3.1. Materiales.....	23

3.3.2. Equipos.....	24
3.4. Metodología.....	24
3.4.1. Niveles de infiltración en diferentes modelos	24
3.4.2. Influencia del clima en la infiltración	25
3.4.3. Relación de la infiltración con la granulometría	26
3.4.4. Comparación de los niveles de infiltración	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. Niveles de infiltración en diferentes modelos	27
4.1.1. Parámetros de los modelos	27
4.1.2. Rendimiento de los modelos	29
4.1.3. Valores de infiltración de los modelos	31
4.2. Influencia del clima en la infiltración.....	32
4.3. Relación de la infiltración con la granulometría	34
4.4. Comparación de los niveles de infiltración en dos usos de suelo	36
V. CONCLUSIONES	38
VI. RECOMENDACIONES	39
VII. REFERENCIAS	40
VIII. ANEXOS	44

ÍNDICE DE TABLA

Tabla		Pag
1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio	19
2.	Ubicación de las muestras	23
3.	Ajuste de datos experimentales a modelos de infiltración	30
4.	Correlación de las precipitaciones con la constante de infiltración de Horton	33
5.	Diagrama de cajas de la infiltración en los dos sistemas de uso de suelo.....	37

ÍNDICE DE FIGURA

Figura	Pag
1. Ubicación geográfica de la zona de estudio	19
2. Ubicación de las muestras	23
3. Ajuste de datos experimentales a modelos de infiltración	30
4. Correlación de las precipitaciones con la constante de infiltración	33
5. Diagrama de cajas de la infiltración en los dos sistemas de uso de suelo.....	37
6. Usos de suelo de Bosque.....	44
7. Usos de suelo de plantaciones de Coco.....	44
8. Muestreo de suelo de bosque	45
9. Muestreo de plantaciones de Coco.....	45
10. Muestras de suelo de bosque y de coco	46
11. Muestras empaquetadas de suelo de bosque y de coco.....	46
12. Cilindro de doble anillo externo.....	47
13. Cilindro de doble anillo interno	47
14. Regla flotadora	48
15. Martillo de goma para el cilindro infiltrómetro	48
16. Mapa de ubicación de muestreo	49
17. Resultados del análisis granulométrico de suelos	50

RESUMEN

La infiltración es un parámetro muy importante en el ciclo hidrológico y es determinante en riesgos naturales como la erosión e inundación. Actualmente los suelos usados para cultivos pueden estar cambiando sus valores de infiltración, representado. Por ello en esta investigación se estudió la infiltración del suelo en dos zonas del Sector Vista Alegre, Supte: un bosque natural y un cultivo de coco. Se utilizaron modelos de infiltración como Horton, Kostiakov y Green-Ampt para analizar los datos recopilados con un infiltrómetro de doble cilindro. En el modelo de Horton, el bosque natural mostró una tasa de decaimiento (k) de 0.026 min^{-1} y una máxima altura de infiltración (h_e) de 8.5 cm, mientras que el cultivo de coco tuvo un k de 0.031 min^{-1} y un h_e de 6.2 cm. El modelo de Horton tuvo el mejor ajuste, especialmente por su comportamiento asintótico en la tasa de infiltración. Se observó una correlación negativa de -0.61571 entre la precipitación acumulada en un día y la tasa de infiltración, lo que sugiere un aumento en el riesgo de escorrentía e inundación con mayor precipitación. A pesar de similitudes en la composición granulométrica y densidades aparentes (1.87 g/cm^3 para el cultivo de coco y 1.86 g/cm^3 para el bosque natural), la tasa media de infiltración fue significativamente mayor en el bosque natural (4.02 cm/h) en comparación con el cultivo de coco (2.99 cm/h), con un p-valor de 0.024. En conclusión, el estudio reveló que el bosque natural presenta mejores características de infiltración en comparación con el cultivo de coco. El modelo de Horton fue el más adecuado para representar las tasas de infiltración, y se identificó una correlación negativa entre la precipitación y la tasa de infiltración, lo que eleva el riesgo de escorrentía e inundaciones.

Palabras clave: Infiltración, Modelo de Horton, Bosque natural, Cultivo de coco, Precipitación

ABSTRACT

Infiltration is a very important parameter in the hydrological cycle and is determinant in natural risks such as erosion and flooding. Currently, soils used for crops may be changing their infiltration values. Therefore, in this research, soil infiltration was studied in two areas of the Vista Alegre Sector, Supte: a natural forest and a coconut crop. Infiltration models such as Horton, Kostiakov and Green-Ampt were used to analyze the data collected with a double cylinder infiltration meter. In the Horton model, the natural forest showed a decay rate (k) of 0.026 min^{-1} and a maximum infiltration height (h_e) of 8.5 cm, while the coconut crop had a k of 0.031 min^{-1} and a h_e of 6.2 cm. The Horton model had the best fit, especially because of its asymptotic behavior in the infiltration rate. A negative correlation of -0.61571 was observed between cumulative precipitation in a day and infiltration rate, suggesting an increase in runoff and flood risk with higher precipitation. Despite similarities in grain size composition and bulk densities (1.87 g/cm^3 for the coconut crop and 1.86 g/cm^3 for the natural forest), the mean infiltration rate was significantly higher in the natural forest (4.02 cm/h) compared to the coconut crop (2.99 cm/h), with a p -value of 0.024. In conclusion, the study revealed that the natural forest presents better infiltration characteristics compared to the coconut crop. The Horton model was the most adequate to represent infiltration rates, and a negative correlation between precipitation and infiltration rate was identified, which increases the risk of runoff and flooding.

Key words: Infiltration, Horton model, Natural forest, Coconut crop, Precipitation.

I. INTRODUCCIÓN

La infiltración del agua en el suelo es un fenómeno que tiene implicancias significativas en diversos aspectos ecológicos y socioeconómicos. El cambio en los sistemas de uso de suelo, como la transformación de bosques naturales en áreas de cultivo, puede tener un efecto marcado en la capacidad de infiltración de un territorio, lo que a su vez puede influir en fenómenos como inundaciones, erosión y el ciclo del agua en general. Por ejemplo, una disminución en la capacidad de infiltración en suelos destinados al cultivo de coco puede incrementar el escurrimiento superficial del agua, aumentando el riesgo de inundaciones en áreas circundantes. Según Smith et al. (2019), las áreas de cultivo experimentan una reducción de hasta el 25% en las tasas de infiltración en comparación con los bosques naturales. Este dato es especialmente relevante en regiones con altas tasas de precipitación, como es el caso de la selva alta del Perú, que según registros climatológicos, recibe precipitaciones anuales cercanas a los 3600 mm (Martínez, 2017). Además, la erosión del suelo puede verse exacerbada con la disminución de la infiltración, afectando la calidad del suelo y, por ende, su capacidad para sostener vida vegetal. Wilson y Grizzle (2018) señalan que la erosión del suelo puede aumentar hasta en un 40% en áreas donde la infiltración se ha reducido significativamente.

Es también relevante considerar las implicaciones a largo plazo en el ciclo del agua. Una disminución en la infiltración afecta la recarga de acuíferos y, por ende, la disponibilidad de agua subterránea para diversos usos, incluida la agricultura y el consumo humano (Gupta & Agarwal, 2020). Por lo tanto, el cambio en los sistemas de uso de suelo y su impacto en la infiltración del agua representa una problemática de relevancia que demanda investigación detallada, especialmente en contextos geográficos específicos donde estos cambios pueden tener consecuencias particularmente graves.

Aunque existe literatura que aborda el tema de la infiltración del agua en el suelo en diferentes contextos, hay un vacío significativo en la investigación cuando se trata de entender cómo la infiltración se ve alterada específicamente en los sistemas de uso de suelo de cultivo de coco y bosque natural en la selva alta del Perú. Este vacío es aún más notable cuando consideramos que la región en cuestión se clasifica como superhúmeda y cálida según la clasificación de Thornthwaite, con precipitaciones anuales cercanas a los 3600 mm.

La falta de información sobre esta problemática representa una brecha de conocimiento que necesita ser abordada para entender mejor la dinámica de la infiltración en estos sistemas

de uso de suelo específicos. El hecho de que no se hayan realizado estudios que comparen directamente estos dos tipos de uso de suelo en este contexto geográfico único, plantea interrogantes sobre la sostenibilidad de las prácticas de uso de la tierra en la región y sus impactos a largo plazo. Además, las implicaciones de estos cambios en la infiltración no solo son ecológicas sino también sociales y económicas, lo que añade urgencia a la necesidad de investigación detallada en esta área.

Actualmente el sector Vista Alegre – Supte San Jorge, viene afrontando frecuentemente encharcamiento e inundaciones leves que afectan las construcciones precarias de las viviendas, así como cultivos agrícolas, trayendo como consecuencia la erosión y pérdida de compactación en el suelo por ello se formula las siguientes preguntas de la investigación:

¿Existe diferencia significativa de los niveles de infiltración de dos sistemas de uso de suelo (cultivo de coco y bosque natural) en el sector Vista Alegre, Supte?

1.1. Hipótesis

H₀: No existe diferencia significativa de los niveles de infiltración de dos sistemas de uso de suelo (cultivo de coco y bosque natural) en el sector Vista Alegre, Supte

H_a: Existe diferencia significativa de los niveles de infiltración de dos sistemas de uso de suelo (cultivo de coco y bosque natural) en el sector Vista Alegre, Supte

1.2. Objetivo general

Evaluar la infiltración en dos sistemas de uso de suelo (cultivo de coco y bosque natural) en el sector Vista Alegre, Supte.

1.3. Objetivos específicos

Determinar mediante diferentes modelos los niveles de infiltración en dos sistemas de uso de suelo en el sector Vista Alegre, Supte.

Determinar la influencia del clima en los niveles de infiltración en dos sistemas de uso de suelo en el sector Vista Alegre, Supte.

Analizar la relación de la infiltración con la granulometría en dos sistemas de uso de suelo en el sector Vista Alegre, Supte.

Comparar los niveles de infiltración en dos sistemas de uso de suelo en el sector Vista Alegre, Supte.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua del suelo es absorbida desde la superficie del terreno hacia capas subterráneas. Este fenómeno es esencial para diversos aspectos, incluida la recarga de acuíferos, la irrigación agrícola y el ciclo hidrológico general (Dingman, 2002). La infiltración está influenciada por una variedad de factores como la textura del suelo, el contenido de humedad, la densidad y la vegetación, así como las condiciones climáticas (Brady & Weil, 1999).

2.1.2. Factores que afectan la infiltración

La infiltración es un proceso complejo que está influenciado por múltiples factores, que a menudo interactúan entre sí de maneras intrincadas. Los siguientes son algunos de los factores más prominentes:

2.1.2.1. Textura del suelo

La textura del suelo es un factor determinante en la velocidad y la eficiencia de la infiltración de agua. Se define en términos de la proporción de diferentes tipos de partículas del suelo, como arena, limo y arcilla. Cada uno de estos componentes tiene sus propias propiedades físicas, incluida la porosidad, que afectan directamente la infiltración.

Suelos Arenosos

Los suelos arenosos suelen tener una alta porosidad y grandes espacios entre las partículas del suelo. Estas características permiten que el agua se infiltre rápidamente, lo que puede ser beneficioso en entornos con escasez de agua. Sin embargo, una alta velocidad de infiltración también puede significar que el agua se mueve demasiado rápidamente a través del perfil del suelo, lo que puede limitar la cantidad de agua disponible para las plantas (Hillel, 1998).

Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son casi opuestos a los suelos arenosos en términos de propiedades de infiltración. Tienen una porosidad mucho más baja y los tamaños de poro son generalmente más pequeños. Esto resulta en una tasa de infiltración mucho más

lenta. Además, los suelos arcillosos pueden desarrollar una costra superficial cuando se mojan y luego se secan, lo que puede reducir aún más las tasas de infiltración (Rawls et al., 1993).

Suelos Limosos

Los suelos limosos son intermedios entre los suelos arenosos y arcillosos. Ofrecen una tasa de infiltración moderada y son capaces de retener más agua que los suelos arenosos pero menos que los suelos arcillosos. La infiltración en estos suelos también está fuertemente influenciada por otros factores como la estructura del suelo y el contenido de materia orgánica (Saxton & Rawls, 2006).

Es importante notar que la textura del suelo no es uniforme a lo largo del perfil del suelo y puede variar significativamente incluso dentro de una misma área geográfica. Por lo tanto, una evaluación precisa de la textura del suelo en diferentes profundidades es crucial para comprender las tasas de infiltración en un lugar específico (Hillel, 1998).

2.1.2.2. Estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere a la forma en que las partículas de suelo individuales (arena, limo y arcilla) están organizadas y unidas entre sí para formar agregados o grumos. Estos agregados pueden tener diferentes formas y tamaños, desde estructuras granulares y esféricas hasta estructuras más en forma de placa. La forma y la calidad de estos agregados afectan significativamente la infiltración de agua en el suelo.

Suelos Bien Estructurados

Los suelos bien estructurados suelen tener agregados estables que permiten la creación de poros más grandes y más conectados entre ellos. Esto facilita el movimiento del agua y el aire, permitiendo así una mayor velocidad de infiltración. Estos suelos suelen ser más resistentes a la erosión y ofrecen un mejor hábitat para la actividad microbiana, lo que también puede contribuir a tasas de infiltración más rápidas (Brady & Weil, 1999).

Suelos Compactados o Degradados

Por otro lado, los suelos compactados o degradados suelen tener una estructura pobre, con agregados menos estables y más pequeños. Esto reduce la porosidad y, por lo tanto, la tasa de infiltración. La compactación del suelo puede ocurrir por diversas razones, como el tráfico pesado de maquinaria o la sobreexplotación agrícola, y suele resultar en tasas de infiltración más bajas (Pitts et al., 1991).

Importancia del Manejo del Suelo

La estructura del suelo puede ser manipulada hasta cierto punto a través de prácticas de manejo del suelo como la labranza conservacionista, la rotación de cultivos y la adición de materia orgánica. La mejora de la estructura del suelo puede ser una estrategia eficaz para mejorar la infiltración y, en última instancia, la disponibilidad de agua para las plantas (Six et al., 2002).

Es esencial reconocer que la estructura del suelo y la textura del suelo a menudo interactúan para influir en la tasa de infiltración. Por ejemplo, un suelo arcilloso pero bien estructurado puede tener tasas de infiltración relativamente altas en comparación con un suelo arenoso pero compactado (Brady & Weil, 1999).

2.1.2.3. Contenido de humedad inicial

El contenido de humedad inicial del suelo es otro factor crucial que influye en las tasas de infiltración de agua. Antes de un evento de precipitación o riego, el nivel de humedad ya presente en el suelo puede afectar significativamente la cantidad de agua que finalmente se infiltra.

Suelos Secos

En suelos que están relativamente secos antes de un evento de precipitación, la matriz del suelo tiene una fuerte atracción por el agua, lo que resulta en tasas de infiltración inicialmente más altas. Esto se debe a la menor resistencia al flujo de agua debido a la tensión capilar reducida y los poros más abiertos (Chow et al., 1988).

Suelos Húmedos

Por otro lado, en suelos que ya están saturados o cercanos a la saturación, la infiltración de agua adicional puede ser lenta. Esto se debe a que los poros del suelo ya están llenos de agua, lo que limita el espacio disponible para la infiltración adicional. En tales casos, es más probable que el agua se acumule en la superficie, lo que podría llevar a la escorrentía y la erosión (Rawls et al., 1993).

Cambios Temporales y Estacionales

Es importante tener en cuenta que el contenido de humedad del suelo puede variar temporalmente debido a factores como la evaporación, la transpiración de las plantas y los patrones estacionales de precipitación. Por lo tanto, las tasas de infiltración pueden variar a lo largo del tiempo incluso en una ubicación específica (Dirksen, 1999).

Importancia en la Agricultura y la Gestión del Agua

Comprender el contenido de humedad inicial del suelo es especialmente relevante para la agricultura y la gestión del agua, ya que puede ayudar a optimizar el riego y reducir la pérdida de agua y nutrientes por escorrentía (Wallace & Terry, 1998).

2.1.2.4. Vegetación

La vegetación es un componente clave que puede afectar significativamente las tasas de infiltración del agua en el suelo. La presencia de plantas y su densidad pueden tener múltiples efectos que van desde la modificación estructural del suelo hasta la reducción de la erosión superficial.

Acción de las Raíces

Las raíces de las plantas pueden penetrar en el suelo y crear una especie de "red" subterránea que mejora la estructura del suelo, facilitando el movimiento del agua. Esto crea canales más directos para que el agua se infiltre, conocidos como "macroporos", que pueden aumentar significativamente la tasa de infiltración (Lal & Shukla, 2004).

Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal también juega un papel en proteger la superficie del suelo contra el impacto directo de las gotas de lluvia, lo que reduce la compactación y la erosión del suelo. Esto a su vez permite una infiltración más efectiva del agua (Morgan, 2005).

Materia Orgánica

Las plantas contribuyen al contenido de materia orgánica en el suelo mediante la descomposición de hojas, raíces y otros tejidos vegetales. La materia orgánica mejora la estructura del suelo y aumenta su capacidad para retener agua, lo que puede aumentar la infiltración de agua (Hudson, 1994).

Efectos de la Transpiración

Además, la transpiración de las plantas puede afectar el contenido de humedad del suelo, que como hemos discutido antes, es otro factor que influye en la tasa de infiltración. Plantas con altas tasas de transpiración pueden secar el suelo más rápidamente, afectando así las tasas futuras de infiltración (Dunne & Leopold, 1978).

2.1.2.5. Condiciones Climáticas

Las condiciones climáticas son un factor crítico que puede afectar la infiltración del agua en el suelo. Los aspectos del clima que son particularmente relevantes incluyen la cantidad, intensidad y duración de la precipitación, así como la velocidad del viento.

Precipitación

La intensidad de la precipitación es crucial porque determina la cantidad de agua disponible para infiltrarse en el suelo. Si la intensidad es muy alta, la tasa de infiltración podría no ser suficiente para absorber toda el agua, resultando en escorrentía superficial (Dingman, 2002). Por otro lado, precipitaciones más ligeras y prolongadas permiten que el suelo absorba agua de manera más eficiente.

Duración

La duración de un evento de precipitación también es importante. Eventos de lluvia más prolongados pueden saturar el suelo, disminuyendo las tasas de infiltración con el tiempo. Esto a menudo requiere una consideración más detallada en los modelos de infiltración (Chow et al., 1988).

Velocidad del Viento

El viento puede contribuir a la evaporación de la humedad superficial, afectando así el contenido de humedad inicial del suelo antes de un evento de precipitación. Esto puede tener un impacto en la tasa de infiltración, especialmente en ambientes áridos o semiáridos (Sene, 1999).

Efecto de la temperatura en la Viscosidad del Agua

A temperaturas más bajas, la viscosidad del agua aumenta, lo que puede reducir la tasa de infiltración. Por el contrario, a temperaturas más altas, la viscosidad del agua disminuye, lo que podría aumentar la tasa de infiltración (Gardner, 1960).

Efecto de la temperatura en la Estructura del Suelo

Las temperaturas extremas, tanto frías como calientes, pueden afectar la estructura del suelo. Por ejemplo, el suelo puede congelarse en condiciones de frío, lo que limitaría la infiltración de agua. Del mismo modo, altas temperaturas pueden causar la evaporación de la humedad del suelo, lo que afectaría el contenido de humedad inicial antes de un evento de precipitación (Kutílek & Nielsen, 1994).

Efecto de la temperatura en las Interacciones Bioquímicas

La actividad biológica en el suelo también está influenciada por la temperatura. Los microorganismos y las raíces de las plantas pueden ser más o menos activos dependiendo de la temperatura, lo cual puede tener un efecto indirecto en la estructura del suelo y, por ende, en la infiltración (Linn & Doran, 1984).

2.1.3. Métodos para medir la infiltración

2.1.3.1. Método de doble cilindro

Este es uno de los métodos más comúnmente utilizados para medir la tasa de infiltración del agua en el suelo. Consiste en colocar dos anillos concéntricos de metal en el suelo, generalmente con una separación de algunos centímetros entre ellos. Ambos anillos se llenan con agua, y se observa y registra la velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo. La diferencia en el nivel del agua entre los dos anillos se utiliza para calcular la tasa de infiltración. Este método se considera bastante preciso, ya que el anillo exterior minimiza el flujo lateral de agua, permitiendo una medición más precisa del flujo vertical de agua en el suelo (Reynolds et al., 2002).

Ventajas:

- Medición precisa debido a la minimización del flujo lateral.
- Adecuado para diferentes tipos de suelos.

Desventajas:

- Puede ser laborioso y requiere una cuidadosa instalación de los anillos.
- No es adecuado para suelos con alta presencia de rocas o raíces que puedan obstruir la infiltración.

2.1.3.2. Método del Infiltrómetro

Este método utiliza un cilindro perforado o un dispositivo similar que se coloca en el suelo. El cilindro se llena con agua, y se mide la velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo. A diferencia del método de anillo doble, este método generalmente aplica agua al suelo a una tasa constante, permitiendo así mediciones más estandarizadas. Sin embargo, es esencial que el cilindro se instale correctamente para evitar el flujo lateral del agua (Philip, 1957).

Ventajas:

- Puede ser más rápido y más fácil de configurar que el método de anillo doble.

- Adecuado para un amplio rango de condiciones del suelo.

Desventajas:

- Puede ser menos preciso si no se instala correctamente.
- Requiere un suministro constante de agua.

2.1.3.3. Método del Flujo Ascendente

Este es un método menos común y se basa en medir la tasa de ascenso del agua en un tubo vertical después de aplicar agua al suelo. Es especialmente útil para suelos con baja permeabilidad, donde la infiltración es más lenta. Este método puede ser más complicado de implementar y generalmente se usa en investigaciones más especializadas (Hillel, 1998).

Ventajas:

- Adecuado para suelos con baja permeabilidad.
- Ofrece datos útiles para estudios especializados.

Desventajas:

- Más complicado de implementar.
- Menos común y, por lo tanto, menos estandarizado.

2.1.3.4. Método de Doble Anillo con Tensiómetro

Este método es una variación del método de anillo doble estándar, en el que se utiliza un tensiómetro para medir la humedad del suelo en el área entre los anillos. Los tensiómetros son dispositivos que miden la tensión del agua en el suelo y, por lo tanto, proporcionan una medida más precisa de la humedad del suelo en tiempo real. Esto puede ser particularmente útil para estudios que requieren un alto grado de precisión o para suelos que tienen variabilidad en sus propiedades de infiltración (Dane & Topp, 2002).

Ventajas:

- Proporciona medidas más precisas de la humedad del suelo.
- Útil para suelos con alta variabilidad en las propiedades de infiltración.
- Permite un seguimiento en tiempo real de la infiltración.

Desventajas:

- Más costoso debido al equipo adicional necesario.
- Puede ser más complicado de configurar y calibrar correctamente.

2.1.4. Modelos de infiltración

Los modelos de infiltración son herramientas matemáticas que describen cómo el agua penetra en el suelo a lo largo del tiempo. Estos modelos son fundamentales para entender y gestionar varios aspectos relacionados con la hidrología, la agricultura, la erosión y el manejo de cuencas hidrográficas. Los modelos de infiltración más comúnmente empleados en la literatura científica son el modelo de Horton, el modelo de Kostiakov y el modelo de Green-Ampt.

El modelo de Horton es uno de los enfoques más antiguos y se centra en la suposición de que la tasa de infiltración disminuirá exponencialmente hasta llegar a una tasa constante (Horton, 1940). Aunque es un modelo empírico, su simplicidad lo hace fácilmente aplicable en una variedad de contextos, especialmente en suelos arenosos y arcillosos (Rawls et al., 1992).

Por otro lado, el modelo de Kostiakov plantea que la tasa de infiltración disminuirá como una función potencial del tiempo. Este modelo es especialmente útil para suelos cuya tasa de infiltración no se estabiliza con el tiempo (Kostiakov, 1932; Philip, 1957).

En contraste, el modelo de Green-Ampt es un modelo más físico que tiene en cuenta las propiedades específicas del suelo, como la conductividad hidráulica y la presión capilar (Green & Ampt, 1911). Aunque es más complejo y requiere la determinación de múltiples parámetros, ofrece una descripción más detallada y precisa de la infiltración (Das, 2018).

En resumen, la elección del modelo de infiltración depende de varios factores, incluido el tipo de suelo, las condiciones climáticas y las necesidades específicas del proyecto de investigación o de gestión (Chu, 1997).

2.1.4.1. Modelo de Horton

El modelo de Horton es uno de los más antiguos y ampliamente utilizados para describir el proceso de infiltración en suelos. Fue desarrollado por Robert E. Horton en 1933 y se basa en la idea de que la infiltración disminuye exponencialmente con el tiempo hasta alcanzar una tasa constante, también conocida como tasa de infiltración estable o "tasa de infiltración básica" (Horton, 1933). Matemáticamente, el modelo de Horton se expresa como:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Donde $f(t)$ es la tasa de infiltración en el tiempo t , f_c es la tasa de infiltración constante, f_0 es la tasa de infiltración inicial, y k es una constante de decaimiento.

Este modelo se aplica mejor en situaciones donde la superficie del suelo está inicialmente seco y luego se somete a un evento de precipitación. Es especialmente útil para suelos que experimentan una rápida disminución en la tasa de infiltración con el tiempo (Rawls, Brakensiek & Saxton, 1982).

Aunque el modelo de Horton ha sido aplicado en numerosos estudios y contextos, también ha sido criticado por su simplicidad y la necesidad de calibración específica para diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas (Mishra, Singh & Raghuwanshi, 2003).

2.1.4.2. Modelo de Kostiakov

El modelo de Kostiakov fue desarrollado por el hidrólogo ruso A.N. Kostiakov en 1932, y es otro enfoque ampliamente utilizado para describir el proceso de infiltración. Este modelo matemático se basa en la suposición de que la infiltración no se estabiliza con el tiempo, a diferencia del modelo de Horton. En lugar de eso, la tasa de infiltración disminuye como una función potencial del tiempo. La ecuación que representa este modelo es:

$$F(t) = \frac{k \cdot t^{(n+1)}}{(n + 1)} \quad (2)$$

Donde $F(t)$ es la cantidad total de agua infiltrada en el tiempo t , y k y n son constantes que deben ser determinadas experimentalmente para cada tipo de suelo y condiciones específicas (Kostiakov, 1932).

El modelo de Kostiakov es particularmente útil en escenarios donde la infiltración disminuye más lentamente con el tiempo, y es especialmente aplicable a suelos arcillosos y loam. Sin embargo, el modelo también tiene sus limitaciones, incluida la necesidad de calibrar las constantes para cada tipo de suelo y su incapacidad para alcanzar una tasa constante de infiltración (Philip, 1957).

Al igual que con el modelo de Horton, el modelo de Kostiakov ha sido objeto de varias modificaciones y adaptaciones para hacerlo más aplicable a diferentes tipos de suelos y condiciones (Liang et al., 2007).

2.1.4.3. Modelo de Green Ampt

El modelo de Green-Ampt es un modelo de infiltración que fue desarrollado inicialmente por W.H. Green y G.A. Ampt en 1911. Este modelo se diferencia de los modelos de Horton y Kostiakov al incorporar parámetros del suelo como la conductividad hidráulica y la presión capilar, haciendo que sea un modelo más físicamente basado (Green & Ampt, 1911). La ecuación general para el modelo de Green-Ampt es:

$$F - n \cdot \psi_f \cdot \ln \left(1 + \frac{F}{n \cdot \psi_f} \right) = K \cdot t \quad (3)$$

Donde $F(t)$ es la cantidad total de agua infiltrada hasta el tiempo t , K es la conductividad hidráulica del suelo saturado, ψ_f es la presión capilar en la profundidad de la capa húmeda en el suelo.

El modelo de Green-Ampt es útil para describir la infiltración en suelos que tienen propiedades del suelo y condiciones iniciales bien definidas. Sin embargo, debido a su naturaleza más compleja y la necesidad de determinar varios parámetros del suelo, el modelo puede ser más difícil de aplicar que los modelos de Horton y Kostiakov (Das, 2018).

El modelo de Green-Ampt ha encontrado aplicaciones en una variedad de campos, incluidos la hidrología, la ingeniería agrícola y la gestión del agua (Chu, 1997).

2.1.5. Suelos de cultivo de coco (*Cocos nucifera L.*)

El cocotero (*Cocos nucifera L.*) es una palma tropical que se cultiva principalmente por su fruto, el coco. Los suelos donde se cultiva esta planta suelen tener características particulares que pueden influir en la tasa de infiltración de agua. A continuación, se describen algunos de estos aspectos:

Textura del Suelo

Los cocoteros suelen crecer mejor en suelos arenosos o arenosos francos, los cuales tienen buena aireación y drenaje (Ohler, 1999). Estas características favorecen tasas de infiltración más rápidas en comparación con suelos más arcillosos o compactos.

Estructura del Suelo

La presencia de raíces de cocotero y la acumulación de materia orgánica en la superficie (como hojas y cáscaras de coco) pueden mejorar la estructura del suelo. Esto a su vez puede facilitar la infiltración del agua en el suelo (Liyanage & Dassanayake, 1990).

Contenido de Humedad Inicial

Los cocoteros, al ser plantas tropicales, a menudo crecen en áreas con altas precipitaciones. Esto podría significar que los suelos pueden tener un contenido de humedad inicial más alto, lo que podría reducir la tasa de infiltración, especialmente durante eventos de lluvia intensa (Raghavan & Magat, 1997).

Vegetación y Cobertura del Suelo

Los cocoteros tienden a tener un dosel denso, lo que puede disminuir la velocidad a la que el agua de lluvia llega al suelo, permitiendo una mejor infiltración. Además, el uso de cultivos intercalados o la presencia de vegetación secundaria pueden contribuir a una mejor estructura del suelo y, por ende, a una infiltración más eficiente (Chan & Elevitch, 2006).

2.1.6. Suelo de bosque natural

En la selva alta tropical, los bosques naturales presentan un conjunto de características de suelo únicas que pueden influir significativamente en las tasas de infiltración de agua. A continuación, se describen algunos de estos aspectos:

Textura del Suelo

Los suelos de bosques tropicales suelen ser más ricos en materia orgánica, lo que modifica su textura y mejora la capacidad de retener humedad. Estos suelos pueden ser más arcillosos en comparación con suelos de cultivos como el coco, lo que podría resultar en tasas de infiltración más lentas (Brady & Weil, 2008).

Estructura del Suelo

La acumulación de hojas caídas, ramas y otros residuos vegetales en el piso del bosque contribuye a una estructura de suelo bien aireada y suelta. Esto puede facilitar la rápida infiltración de agua durante los eventos de precipitación (Hillel, 2004).

Contenido de Humedad Inicial

Debido al denso dosel del bosque y la alta precipitación en la selva alta tropical, los suelos suelen tener un contenido de humedad más alto. Este factor podría disminuir las tasas de infiltración iniciales durante eventos de lluvia intensa (Bonell & Bruijnzeel, 2004).

Vegetación

La vegetación del bosque tropical tiene un papel crucial en la infiltración. Las raíces de los árboles y otras plantas forman una red compleja que crea canales de macroporos en el suelo, facilitando la infiltración del agua (Nepstad et al., 1994).

2.2. Antecedentes

2.2.1. Internacionales

En la investigación realizada por Bajirao y Vishnu (2023), el objetivo central fue evaluar la efectividad de diferentes modelos de infiltración en la estimación de las tasas de infiltración del suelo bajo diversas condiciones de uso del terreno y composición del suelo. Este estudio es de suma importancia para el diseño y la evaluación de sistemas de riego sostenibles, ya que la comprensión detallada de la infiltración es crucial para estos sistemas. Para llevar a cabo el estudio, los autores realizaron experimentos de campo usando un instrumento de infiltración de doble anillo, una técnica común pero robusta para medir las tasas de infiltración. Con los datos recopilados en el campo, se desarrollaron y evaluaron varios modelos de infiltración reconocidos, incluidos los modelos de Horton, Philip, Kostiakov y Green-Ampt. Cada modelo fue evaluado en función de su capacidad para predecir con precisión la tasa de infiltración del suelo bajo diferentes condiciones, desde bosques y superficies duras hasta tierras cultivadas y terrenos baldíos. El rendimiento de estos modelos se cuantificó usando el coeficiente de determinación (R^2). En el caso de las tasas de infiltración, se descubrió que las tasas constantes para los diferentes tipos de terreno variaban notablemente: 6 cm/h para el bosque, 1.36 cm/h para la superficie dura, 2.4 cm/h para la tierra cultivada, y 1.153 cm/h para la tierra estéril. De manera interesante, el modelo de Horton demostró ser el más efectivo en la predicción de tasas de infiltración en terrenos de bosque, superficie dura y tierras cultivadas, con valores de R^2 de 0.9884, 0.935 y 0.98, respectivamente. Por otro lado, el modelo de Kostiakov destacó en su capacidad para predecir tasas en terrenos baldíos, con un valor de R^2 de 0.9706. El modelo de Green-Ampt, en cambio, mostró un rendimiento inferior en comparación con los otros modelos en todas las condiciones examinadas. Este estudio ofrece conclusiones relevantes para el diseño de sistemas de riego y la modelización de procesos hidrológicos en diferentes tipos de terreno. Los modelos desarrollados en esta investigación podrían resultar sumamente útiles para entender y gestionar mejor los recursos hídricos en diversas condiciones de uso del suelo.

En la investigación de Rasool, Dar y Wani, (2021), el estudio se centra en la cuantificación de las características de infiltración del suelo, un problema especialmente complejo debido a las variaciones inherentes en las propiedades del suelo y en los diferentes usos de la tierra. En el marco del estudio, se contemplaron cuatro modelos de infiltración distintos: Horton, Kostiakov, Kostiakov modificado y Philip. Estos modelos se evaluaron

utilizando un infiltrómetro de doble anillo para medir las tasas de infiltración en tres tipos diferentes de cubiertas del suelo, que son tierras de labranza, terrenos edificados y matorrales. El contexto geográfico del estudio es particularmente interesante, ya que se llevó a cabo en una subcuenca urbana del Himalaya Menor, en India, donde las texturas del suelo son predominantemente de arcilla y arcilla arenosa. Los autores llevaron a cabo una evaluación rigurosa de la capacidad predictiva de estos modelos mediante la comparación de las tasas de infiltración medidas en el campo con las tasas previstas por los modelos. Utilizaron varios indicadores estadísticos para evaluar el rendimiento de los modelos y calcularon un Índice de Rendimiento Global (OPI, por sus siglas en inglés) para clasificar estos modelos en función de su efectividad. El estudio concluyó que el modelo de Horton resultó ser el más adecuado para estimar las tasas de infiltración en diferentes cubiertas del suelo y texturas, con valores de OPI de 0,94. Este modelo fue seguido de cerca por el modelo de Philip en términos de efectividad. Estos hallazgos tienen aplicaciones prácticas significativas para la modelización del balance hídrico, así como para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la zona de estudio. En resumen, la investigación ofrece valiosa información para la selección de modelos de infiltración en diferentes contextos de uso del suelo y texturas, y proporciona datos empíricos que podrían ser de utilidad para mejorar las prácticas de gestión de recursos hídricos.

En la investigación de Failache y Zuquette, (2021), se abordó la cuestión de evaluar la eficacia y la idoneidad de diferentes modelos de infiltración, específicamente en arenosoles ferrálicos y ferralsoles ródicos del sur de Brasil. Este estudio es particularmente relevante ya que además evaluó cómo nueve tipos diferentes de uso de la tierra y prácticas de gestión del suelo influyen en la modelización de la infiltración del agua. El enfoque metodológico del estudio fue exhaustivo; se ajustaron 42 curvas de infiltración experimentales utilizando ensayos in situ con un infiltrómetro de doble anillo. Este ajuste se complementó con una caracterización en laboratorio del suelo en cuestión. La evaluación de los resultados se llevó a cabo utilizando indicadores estadísticos básicos y descriptores de precisión del modelo, como el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe y el error cuadrático medio. Los hallazgos son notables por varias razones. Primero, los modelos que se investigaron pudieron simular las tasas de infiltración de forma satisfactoria. El modelo de Kostiakov modificado fue identificado como el más preciso, seguido por una serie de otros modelos como los de Horton, Singh y Yu, Holtan modificado, Holtan, Philip, Green y Ampt/Mein y Larson, y Kostiakov. Segundo, el estudio también destaca cómo las prácticas de gestión del suelo y los diferentes tipos de uso de

la tierra tienen un impacto significativo en las tasas de infiltración. Específicamente, las prácticas que resultaron en una gran presencia de macroporosidad mostraron un comportamiento errático en la infiltración y, por ende, afectaron la precisión de los modelos de infiltración. Estos hallazgos no sólo contribuyen al conocimiento científico en el campo de la hidrología, sino que también tienen aplicaciones prácticas para la gestión sostenible del agua y del suelo en el contexto brasileño y potencialmente en áreas con condiciones similares.

2.2.2. Nacionales

En la investigación realizada por Reyes (2014), se estudió la infiltración inicial (también conocida como sortividad) en cuatro sistemas de uso de la tierra: teca, cítricos, y cultivo de café tanto manejado como en abandono. Esta investigación se llevó a cabo en el IRD Selva, Fundo La Génova, ubicado en la provincia de Chanchamayo, departamento de Junín, en Perú. El objetivo central del estudio fue entender cómo la vegetación influía en la infiltración inicial del agua en el suelo. Los sistemas fueron divididos previamente en función de la pendiente y textura del terreno, y luego se recolectaron muestras de suelo de cada sistema para analizar sus propiedades físicas y químicas, que son factores clave para entender la infiltración del agua. El estudio empleó el método del anillo infiltrómetro individual para medir la sortividad. Los hallazgos del estudio mostraron que la sortividad variaba significativamente entre los diferentes sistemas de uso de la tierra. El sistema de cítricos mostró el mayor valor de sortividad, seguido por el sistema de teca, luego el café en estado de abandono y finalmente el café manejado. Estos datos proporcionan información inicial valiosa para determinar el volumen de agua requerido por cada sistema para un diseño de riego eficaz. También sugieren cómo cada sistema es capaz de captar agua, lo cual es especialmente relevante en periodos de lluvias cuando hay un mayor riesgo de erosión. Aunque esta investigación no se centra específicamente en modelos de infiltración, puede considerarse un antecedente valioso en estudios de infiltración y manejo sostenible del agua. La metodología empleada y los resultados obtenidos sobre cómo la vegetación y las prácticas de uso de la tierra pueden influir en la infiltración inicial ofrecen una base sólida para futuras investigaciones que deseen estudiar modelos de infiltración más complejos o aplicar estos conceptos en diferentes contextos geográficos y climáticos.

El estudio de Quispe y Ynquiltupa (2022), se enfoca en evaluar el factor de seguridad del talud de la margen izquierda de la Quebrada Ayahuayco, en el distrito de

Cusco, Provincia y Departamento de Cusco. La investigación toma en cuenta varios aspectos, incluidos la topografía del área y las propiedades mecánicas del suelo. Un componente clave del estudio fue la realización de ensayos in situ de infiltración, usando el Método de Porchet, así como pruebas de laboratorio para determinar características físicas y mecánicas del suelo. Los resultados del estudio mostraron que el talud investigado es "relativamente estable", con factores de seguridad que, aunque son menores a 1.5, son mayores a 1. Estos resultados sugieren que, si bien el talud no es altamente inestable, hay espacio para mejoras en términos de seguridad. El estudio también ofrece una propuesta de estabilización que incluye la construcción de un muro de contención y el uso de anclajes. Aunque este estudio no se centra exclusivamente en la infiltración de agua en el suelo, sí aborda este aspecto como uno de los varios factores que pueden influir en la estabilidad de un talud. En este sentido, se podría considerar como un antecedente valioso para investigaciones que buscan entender cómo las tasas de infiltración y las propiedades mecánicas del suelo interactúan para afectar la estabilidad de taludes y, en general, la gestión sostenible de recursos hídricos y de tierras.

El estudio de Cruz (2019) se enfoca en el mapeo y análisis de la calidad física y química de los suelos en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Utilizando herramientas del Sistema de Información Geográfico (SIG), el estudio evalúa varios parámetros clave, incluyendo la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua disponible, junto con aspectos químicos como el pH y la conductividad eléctrica. Estos datos se normalizaron y se utilizaron para crear un modelo geoespacial que evalúa la calidad global de los suelos en la UNALM, identificando áreas con calidades desde muy baja hasta muy alta. Si bien el objetivo principal de este estudio es evaluar y caracterizar la calidad del suelo para fines agrícolas, los parámetros que analiza, especialmente aquellos relacionados con la infiltración y la retención de agua, hacen que sea un antecedente valioso para investigaciones centradas en el estudio de la infiltración del agua en el suelo y su relación con la calidad y la gestión del suelo. Por ejemplo, la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua son parámetros cruciales para entender cómo diferentes tipos de uso de la tierra y prácticas de gestión del suelo pueden afectar la infiltración del agua, como se ha investigado en otros estudios citados anteriormente. Además, el uso de herramientas SIG para representar estos datos añade una dimensión espacial al estudio que puede ser de utilidad para investigaciones futuras que busquen comprender la variabilidad espacial en las tasas de infiltración y otros parámetros relacionados.

2.2.3. Locales

No se encontraron antecedentes de investigaciones relacionadas a la infiltración en la localidad

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

La investigación se ejecutará en el sector Vista Alegre, predio Carlos Maby, propiedad de Lucio Manrique de Lara Suarez, que se encuentra en la localidad de Supte - San Jorge, perteneciente al distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco.

3.1.2. Ubicación geográfica

La investigación se llevará a cabo en un cultivo de cocos y un bosque primario. Las coordenadas del área de estudio se encuentran en la Zona 18L del sistema de coordenadas UTM WGS 84. Las coordenadas UTM Este del bosque primario son 0394464, y las coordenadas UTM Norte son 8972782. En cuanto al cultivo de cocos, las coordenadas UTM Este son 0394468 y las coordenadas UTM Norte son 8972664. El bosque primario es una zona natural con densa vegetación y una rica biodiversidad. El cultivo de cocos, por otro lado, es un área de producción agrícola dedicada al cultivo de cocoteros. Ambos lugares ofrecen oportunidades interesantes para la investigación geográfica y ecológica debido a sus diferencias en uso de la tierra y características naturales.

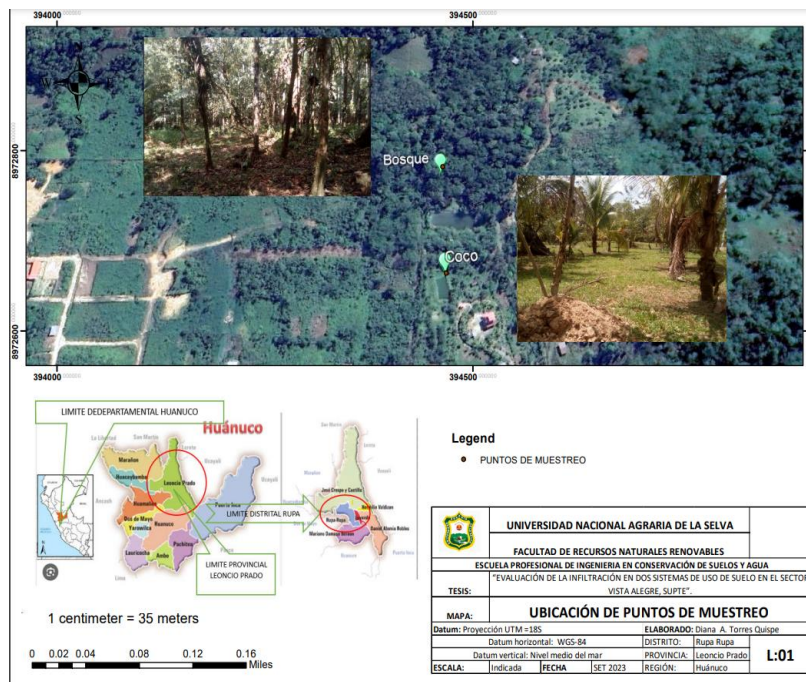


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

3.1.3. Descripción de la zona de estudio

3.1.3.1. Acceso a la Zona de Estudio

Para acceder a la zona de estudio por vía terrestre, se debe tomar la carretera interoceánica centro 1195-1165. A continuación, se gira a la derecha en la Av. Hipólito Tuesta, dirigiéndose hacia la Municipalidad Supte San Jorge. Posteriormente, se realiza un giro a la derecha y se continúa aproximadamente 2.5 km en dirección al sector Vista Alegre.

3.1.3.2. Condiciones Climáticas

La zona se clasifica como un bosque muy húmedo premontano. La temperatura media anual máxima registrada es de 25.6 °C, mientras que la media anual mínima es de 18.5 °C. El promedio máximo de precipitación anual es de 3,500 mm, y la temperatura media anual es de 24.5 °C, según Holdridge (1987).

3.1.3.3. Fisiografía y Zonas de Vida

Fisiográficamente, el sector Vista Alegre se compone de unidades geográficas como lomadas o colinas bajas, caracterizadas por pequeños cerros alargados con pendientes poco pronunciadas que varían entre el 10% y el 30%. Los suelos predominantes son arcillosos y aptos para cultivos en limpio, pastos y cultivos permanentes. Los valles aluviales se distinguen por una topografía plana y están formados por sedimentos aluviónicos recientes y antiguos, principalmente depositados por el río Huallaga, en un paisaje montañoso (Ruiz, Manrique de Lara, & Lindo, 2014).

3.1.3.4. Bosque Natural de la Zona de Estudio

El bosque de la zona es predominantemente arbóreo y arbustivo, con una mayoría de árboles maderables como la caoba, capirona y cedro. También se observa la presencia de la palmera socratea exorrhiza, así como una gran variedad de epifitas. Entre los arbustos se encuentra la *Carludovica palmata*, *Malvaceae*, y *Zamiaceae*. Estas especies han sido gestionadas mediante técnicas de prácticas silviculturales para estimular el repoblamiento y para mitigar problemas de encharcamiento durante las temporadas de lluvia. El bosque abarca una extensión de 1 hectárea en el terreno de estudio.

3.1.3.5. Cultivo de Coco de la Zona de Estudio

En la zona de estudio se encuentra un cultivo de coco con 8 años de antigüedad, que ocupa una superficie aproximada de 0.5 hectáreas. El suelo de esta área está cubierto de pasto silvestre.

3.2. Criterio de investigación

3.2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación empleado en este estudio es de naturaleza explicativa. Este enfoque permite establecer relaciones causa-efecto entre las variables estudiadas, lo que es especialmente relevante para abordar la pregunta de investigación: ¿Existe una diferencia significativa en los niveles de infiltración de agua entre dos sistemas de uso de suelo (cultivo de coco y bosque natural) en el sector Vista Alegre, Supte?

En investigaciones explicativas, el objetivo es ir más allá de la descripción de conceptos y fenómenos o la identificación de patrones y tendencias. Se busca explicar los porqués y cómo de una situación, facilitando la comprensión integral del fenómeno estudiado (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

Este tipo de investigación se justifica dado que la infiltración de agua en el suelo no es un proceso aislado sino que está influenciado por múltiples factores, tales como el tipo de uso de suelo, las propiedades granulométricas del mismo, y las condiciones climáticas. Con un diseño explicativo, es posible discernir cómo y en qué medida cada uno de estos factores afecta la infiltración en los sistemas de suelo estudiados, lo cual es vital para entender su interacción y eventual impacto en aspectos ambientales como inundaciones y erosión.

La adopción de un enfoque explicativo es respaldada por estudios previos que han utilizado métodos similares para investigar problemas relacionados con la infiltración y uso de suelo. Por ejemplo, Wang et al. (2018) aplicaron una metodología explicativa para analizar cómo diferentes prácticas agrícolas afectan la infiltración de agua en suelos arcillosos, encontrando que el cambio de uso de suelo de bosque natural a agrícola redujo significativamente la tasa de infiltración.

3.2.2. Diseño de investigación

Para esta investigación, se opta por un diseño cuasiexperimental. Este tipo de diseño es especialmente apropiado cuando las condiciones del estudio no permiten la manipulación completa de todas las variables o la asignación aleatoria de los sujetos a diferentes grupos (Shadish, Cook & Campbell, 2002). En el caso particular de este estudio, el enfoque

cuasiexperimental permite investigar la influencia del tipo de uso de suelo en los niveles de infiltración en un contexto real, donde las condiciones no pueden controlarse completamente.

En un diseño cuasiexperimental, se seleccionan sitios que representan los dos sistemas de uso de suelo de interés: cultivo de coco y bosque natural. Aunque la asignación a estos grupos no es aleatoria, se emplean técnicas estadísticas para controlar variables de confusión y mejorar la validez interna del estudio (Trochim & Donnelly, 2008).

Las pruebas de infiltración se realizarán en varios puntos dentro de cada sitio para obtener una muestra representativa. Posteriormente, los datos recopilados se analizarán para determinar si existen diferencias significativas en los niveles de infiltración entre los dos sistemas de uso de suelo.

Este diseño cuasiexperimental se justifica por su utilidad en estudios ambientales donde ciertas variables, como las condiciones climáticas y el tipo de suelo, son difíciles de controlar o manipular (Smith, 2009). Por ejemplo, un estudio de Ahearn et al. (2005) utilizó un diseño cuasiexperimental para evaluar los efectos del uso de suelo en la calidad del agua, hallando que las áreas urbanizadas presentaban niveles significativamente mayores de contaminantes que las áreas forestales.

3.2.3. Variables de investigación

Variable Independiente: Tipo de Uso de Suelo

La variable independiente en este estudio es el "Tipo de Uso de Suelo", específicamente, se comparan dos sistemas: cultivo de coco y bosque natural. Esta variable se selecciona debido a su relevancia en la modificación de la capacidad de infiltración del suelo, un fenómeno que puede tener implicaciones significativas en la gestión de recursos hídricos y en problemas ambientales como inundaciones y erosión (Bhattacharyya et al., 2008).

Variable Dependiente: Niveles de Infiltración del Suelo

La variable dependiente es el "Nivel de Infiltración del Suelo", medido a través de diferentes métodos como el método del doble cilindro. Este parámetro representa la cantidad de agua que penetra en el suelo por unidad de tiempo y es un indicador crítico de la capacidad del suelo para retener agua, lo que a su vez afecta otros procesos ecosistémicos y hidrológicos (Ghezzehei & Or, 2010). Dada su importancia, esta variable será analizada en detalle para determinar si el tipo de uso de suelo tiene un impacto significativo en su valor.

3.2.4. Muestra

Se ubicaron cinco puntos de manera aleatoria en cada sistema de uso de suelo, tanto en el cultivo de coco como en el bosque natural. La selección de estos puntos se basó en criterios de aleatoriedad, accesibilidad y condiciones topográficas favorables, como la ausencia de terrenos agrietados o rocosos y la presencia de terrenos planos.

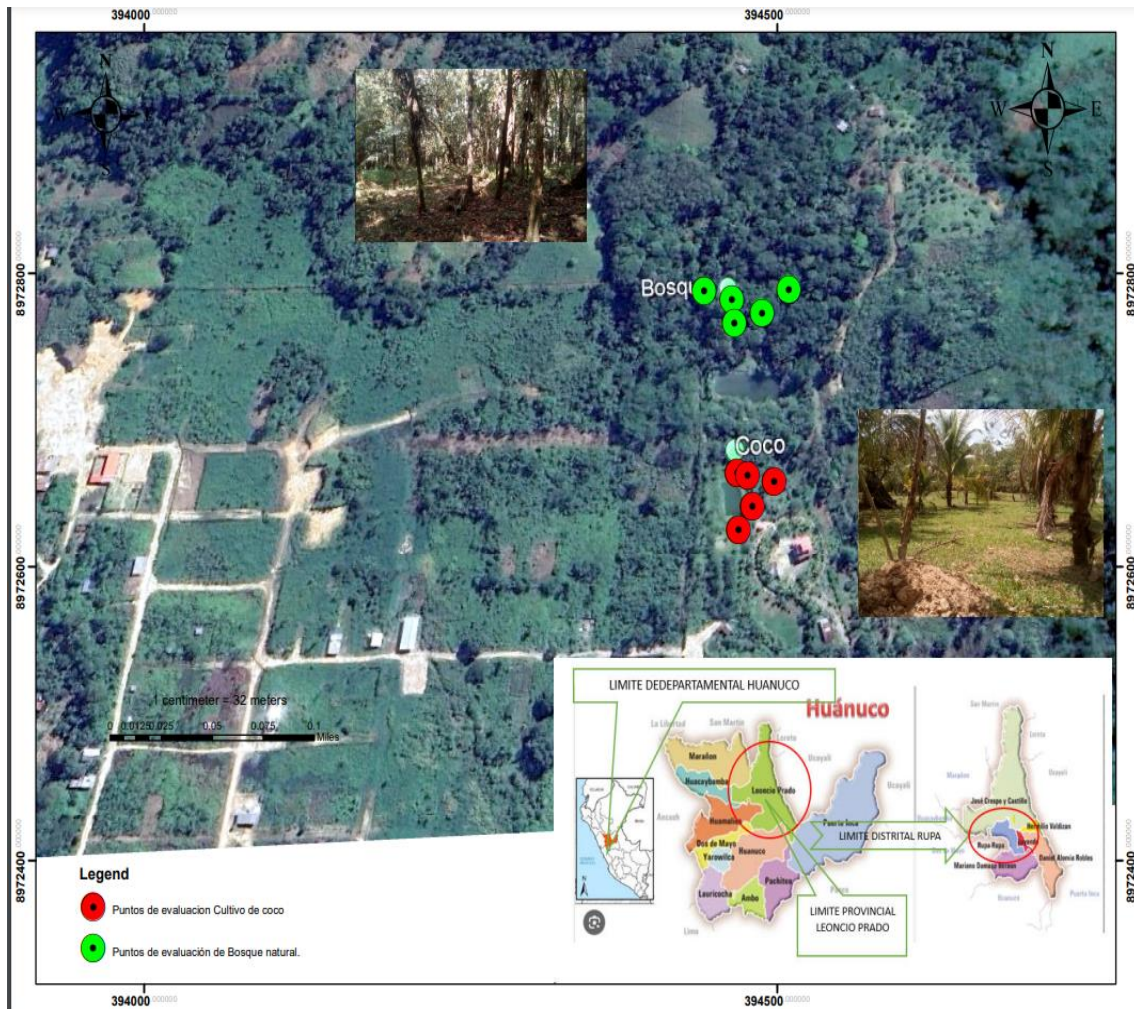


Figura 2. Ubicación de las muestras

3.3. Materiales y equipos

3.3.1. Materiales

En cuanto a los materiales, se usó una regla graduada de al menos 30 centímetros para diversas mediciones. Dos baldes de 10 litros sirvieron para transportar el agua necesaria para los cilindros infiltrómetros. Un cuaderno de apuntes se utilizó para registrar las lecturas de infiltración en ambos tipos de uso de suelo. Para la obtención de muestras de densidad aparente del suelo, se empleó un cilindro de metal de 5 centímetros de diámetro y 5

centímetros de longitud. Una cruz metálica y una comba de goma ayudaron en la instalación uniforme del cilindro de infiltración en el suelo.

3.3.2. Equipos

En la investigación se utilizó un GPS Garmin 62sc para la ubicación de puntos de muestreo. Una laptop facilitó el procesamiento de los datos recopilados. Además, se emplearon dos infiltrómetros de doble anillo de acero para medir la tasa de infiltración del agua en diferentes tipos de suelo. Para garantizar la nivelación precisa del anillo del infiltrómetro, se hizo uso de un nivel de ingeniero. Se documentó la investigación a través de una cámara fotográfica y se recurrió a un cronómetro para medir el tiempo exacto de infiltración del agua en el suelo.

3.4. Metodología

3.4.1. Niveles de infiltración en diferentes modelos

3.4.1.1. Selección del sitio

Para el estudio se eligieron específicamente dos zonas ubicadas cerca de la ciudad de Tingo María, a unos 15 minutos de distancia. Estas zonas comprenden un bosque natural y un cultivo de coco. Se determinó la elección de estos lugares por las marcadas diferencias intrínsecas en la estructura del suelo y la vegetación. En cada uno de estos usos de suelo, se seleccionaron 5 puntos distintos, asegurando una muestra representativa y diversa. Un criterio clave para la elección de estas zonas fue una observación preliminar: en el cultivo de coco se presentaban encharcamientos, lo que sugería a priori una diferencia en la capacidad de infiltración del agua en comparación con el bosque natural. Esta particularidad impulsó la investigación, esperando entender en profundidad las causas y características de estas variaciones en la infiltración entre ambos suelos.

3.4.1.2. Ensayo de doble anillo

Para la evaluación de la infiltración de agua en el suelo se utiliza un infiltrómetro de doble cilindro, acompañado de una regla de 30 centímetros de longitud, una masa o mazo, un nivel de albañil, un cronómetro, una planilla de anotaciones, recipientes con agua y un plástico transparente de dimensiones aproximadas de 50 x 50 centímetros. Inicialmente se selecciona un sitio representativo del tipo de suelo a evaluar, procurando que sea plano y evitando áreas con signos de compactación y grietas. El área seleccionada se limpia de terrones grandes y hierbas que puedan interferir en la instalación del equipo. Se procede a colocar el cilindro interno de manera concéntrica con el cilindro externo. Ambos cilindros se

introducen en el suelo a una profundidad de entre 5 a 10 centímetros, utilizando una tabla y un mazo, y se verifica que estén nivelados. Posteriormente, se instaló una regla en el cilindro interno para las mediciones. Antes de realizar las mediciones, se coloca un plástico transparente en el cilindro interno para evitar la perturbación de la superficie del suelo. Ambos cilindros se llenan con agua hasta alcanzar una lámina de 20 centímetros, que se verifica con la regla.

Una vez preparado el equipo, se activa el cronómetro al momento en que el agua hace contacto con el suelo. Se realizan mediciones de la cantidad de agua infiltrada cada 5 minutos durante un periodo total de 120 minutos, sin agregar más agua para mantener la altura en el cilindro. Todos los datos se registran (alturas y tiempos acumulados) en un cuaderno de anotaciones para posterior análisis, donde se determinan parámetros como la velocidad de infiltración instantánea y la infiltración acumulada.

3.4.1.3. Ajuste de modelos

Una vez obtenidos los datos de tiempo acumulado y alturas de infiltración acumulada, se calcularon los parámetros de los modelos de Horton, Kostiakov y Green-Ampt. Dado que cada uno de estos parámetros tiene una interpretación física de la realidad, se llevó a cabo un análisis detallado de cada modelo y su representación para la infiltración del suelo. Para el ajuste de los datos a los modelos mencionados, se empleó el software Matlab, específicamente el paquete Curve Fitting Toolbox. A partir de estos modelos, se determinaron los coeficientes de determinación R cuadrado para evaluar el nivel de ajuste y se calcularon las tasas de infiltración promedio.

3.4.2. Influencia del clima en la infiltración

Una vez calculadas las infiltraciones en los cinco puntos de cada uno de los tipos de suelo en estudio, que fueron bosque natural y cultivo de coco, se obtuvieron los datos de precipitaciones de la estación Tingo María correspondientes a uno y dos días antes de la toma de muestra. Se estableció como requisito para la toma de muestras que no debía haber llovido el mismo día de la toma, aunque no representaba un problema si había precipitaciones uno o dos días antes. Se calcularon las precipitaciones acumuladas tanto del día anterior como de los dos días acumulados. Estas precipitaciones acumuladas se sometieron a una correlación de Pearson con las tasas de infiltración medidas en cada uno de los puntos, utilizando para ello el software Matlab.

3.4.3. Relación de la infiltración con la granulometría

Se recogieron diez muestras de suelo de la zona de estudio, específicamente cinco de la zona de cultivo de coco y cinco de la zona de bosque natural. De cada lugar se recolectaron 1 kg de suelo en bolsas herméticas diseñadas para la recolección de muestras de suelo. Posteriormente, las cinco bolsas de cada tipo de uso de suelo se combinaron para obtener una muestra compuesta, resultando en una muestra compuesta para la zona de cultivo de coco y otra para la zona de bosque natural. Estas muestras compuestas se llevaron al laboratorio de calidad del suelo de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde se determinaron parámetros como porcentaje de arena, arcilla y limo, así como porcentaje de humedad y densidad aparente. Se analizó cómo la infiltración en cada sistema de uso de suelo se relaciona con estos parámetros granulométricos con el objetivo de poder explicar las características de infiltración observadas.

3.4.4. Comparación de los niveles de infiltración

Se compararon los niveles de infiltración entre los dos sistemas de uso de suelo, bosque natural y cultivo de coco, y se aplicó una prueba de t de Student bilateral para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas. Se estableció un umbral de significancia con un nivel de alfa de 0.05, considerando como hipótesis nula que no existía diferencia significativa entre los niveles de infiltración de ambos tipos de uso de suelo y como hipótesis alternativa que sí existía una diferencia significativa. Para visualizar estas diferencias se elaboró un gráfico de bigotes que comparaba los niveles de infiltración en los dos sistemas de uso de suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Niveles de infiltración en diferentes modelos

4.1.1. Parámetros de los modelos

Modelo de Horton

El modelo de Horton describe la tasa de infiltración como una función exponencialmente decreciente del tiempo con la ecuación $f(t) = h_e \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$ donde $f(t)$ es la altura de infiltración acumulada en el tiempo t , h_e es la máxima altura de infiltración, y k es una constante que determina el ritmo de decaimiento de la tasa de infiltración con el tiempo; la constante k se refiere a la tasa de decaimiento de la infiltración con el tiempo y un valor alto de k indica un rápido decaimiento de la tasa de infiltración desde su valor inicial.

En los datos presentados, el bosque natural tiene un valor de $k = 0.026 \text{ min}^{-1}$ mientras que el cultivo de coco tiene un valor de $k = 0.031 \text{ min}^{-1}$, sugiriendo que la tasa de infiltración en el cultivo de coco decrece un poco más rápido con el tiempo en comparación con el bosque natural lo que indica que el suelo en el cultivo de coco puede tener características diferentes como una estructura de suelo más compacta o menos porosidad que afectan la velocidad de infiltración del agua.

El parámetro h_e representa la máxima altura de infiltración, indicando la reducción en la capacidad de infiltración del suelo a medida que se satura; el bosque natural presenta una $h_e = 8.5 \text{ cm}$ mientras que el cultivo de coco presenta una $h_e = 6.2 \text{ cm}$, sugiriendo que el suelo del bosque tiene una mayor capacidad para permitir la infiltración de agua al principio antes de que el proceso disminuya debido a la saturación y esta mayor capacidad inicial podría estar asociada a una estructura de suelo más suelta y a una mayor cantidad de materia orgánica, características comunes en los bosques naturales; en general, el modelo de Horton es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y capacidad para describir el proceso de infiltración en una amplia variedad de condiciones del suelo y ha sido validado y utilizado en numerosos estudios y aplicaciones prácticas en la hidrología.

Modelo de Kostiakov

La constante k representa la capacidad de infiltración del suelo. En los datos presentados, el bosque natural tiene un valor de $k = 0.43 \text{ cm/min}$ mientras que el cultivo de coco tiene un valor de $k = 0.36 \text{ cm/min}$. Esto sugiere que el suelo del bosque natural tiene una mayor capacidad inicial para permitir la infiltración de agua en comparación con el cultivo de coco.

Diferencias en la estructura del suelo, contenido de materia orgánica y porosidad pueden influir en esta capacidad.

Por otro lado, el parámetro n es una constante que indica cómo cambia la tasa de infiltración con el tiempo. Valores de n más cercanos a cero indican que la tasa de infiltración disminuye rápidamente con el tiempo, mientras que valores de n más alejados de cero indican un decaimiento más lento. El bosque natural presenta un valor de $n = -0.54$ y el cultivo de coco un valor de $n = -0.58$. Ambos valores están restados en una unidad por lo que se podría decir que el decaimiento de la infiltración en el tiempo es moderado (Kostiakov, 1932; Hillel, 1980).

Tabla 1. Parámetros granulométricos de suelos de bosque natural y cultivo de coco y valores de la constante k de infiltración de Horton

Uso de suelo	Horton		Kostiakov		Green - Ampt			
	k	h_e	k	n	k	n	ψ_f	
Unidad	min^{-1}	cm	cm/min	--	cm/min	--	cm	
Bosque Natural	BN-1	0.029	10.6	0.57	-0.54	0.00035	0.24	6362.1
	BN-2	0.031	6.5	0.40	-0.59	0.00015	0.19	7288.3
	BN-3	0.029	7.8	0.43	-0.55	0.00023	0.22	5906.2
	BN-4	0.019	10.0	0.40	-0.48	0.00991	0.24	130.6
	BN-5	0.024	7.5	0.37	-0.52	0.00022	0.20	5286.6
	Prom	0.026	8.5	0.43	-0.54	0.0022	0.22	4994.7
Coco	CC-1	0.038	6.37	0.45	-0.66	0.00017	0.20	6450.6
	CC-2	0.022	5.41	0.23	-0.48	0.00014	0.14	5870.8
	CC-3	0.032	6.04	0.37	-0.60	0.00013	0.19	7287.0
	CC-4	0.022	6.72	0.29	-0.49	0.00706	0.18	125.1
	CC-5	0.038	6.46	0.46	-0.66	0.00017	0.20	6645.3
	Prom	0.031	6.2	0.36	-0.58	0.00154	0.18	5275.8

Modelo de Green Ampt

Tasa de infiltración (k): La tasa de infiltración, representada por k , se refiere a la velocidad a la que el agua penetra en el suelo. En el contexto proporcionado, el bosque natural tiene una tasa de infiltración de 0.0022 cm/min, lo que indica que el agua se infiltra en el suelo del bosque natural a una tasa más alta en comparación con el cultivo de coco, que tiene una tasa de infiltración de 0.00154 cm/min. Estas tasas se observan cuando el frente de humedecimiento es estable. En consecuencia, se puede deducir que el bosque natural tiene un suelo que permite una mayor permeabilidad al agua que el cultivo de coco.

Porosidad (n): La porosidad del suelo, denotada por n , se refiere al porcentaje de volumen de vacíos en el suelo. Un valor más alto indica una mayor cantidad de espacios vacíos en el suelo. En este caso, el bosque natural tiene una porosidad de 0.22, lo que sugiere que tiene más espacios vacíos en comparación con el cultivo de coco, que tiene una porosidad de 0.18. La mayor porosidad en el bosque natural podría ser indicativa de una estructura del suelo más abierta o menos compactada que el cultivo de coco.

Potencial matricial (Ψ_f): El potencial matricial, representado por Ψ_f , se refiere a la fuerza con la que el agua es retenida en el suelo. Valores más altos de potencial matricial indican una mayor retención de agua en el suelo. El potencial matricial del bosque natural es de 4994.7 cm, mientras que en el cultivo de coco es de 5275.8 cm. Esto sugiere que el cultivo de coco retiene el agua con una fuerza ligeramente mayor que el bosque natural. Es probable que esta diferencia se deba a las propiedades físicas y texturales del suelo, que pueden influir en la capacidad de retención de agua.

4.1.2. Rendimiento de los modelos

El modelo de Horton tiene el valor R^2 más alto para ambos tipos de uso del suelo, lo que indica que este modelo se ajusta muy bien a los datos de infiltración observados. Dado que los ensayos de infiltración muestran un comportamiento asintótico, esto se alinea con la naturaleza del modelo de Horton, que describe un descenso exponencial de la tasa de infiltración con el tiempo hasta alcanzar una tasa constante. Esta característica del modelo lo hace adecuado para representar suelos que muestran esta tendencia.

El modelo de Horton es particularmente adecuado para describir comportamientos asintóticos en los datos de infiltración, tal como se muestra en la **Figura 3**. Esta característica se debe a la estructura inherente del modelo, que describe una tasa de infiltración inicialmente alta que disminuye exponencialmente con el tiempo hasta alcanzar una tasa constante. Este comportamiento asintótico es típico en muchos suelos, donde la tasa de infiltración disminuye a medida que el suelo se satura.

Al observar un comportamiento asintótico en los ensayos de infiltración, es lógico que el modelo de Horton presente un ajuste superior, reflejado en los valores de R^2 más altos. La capacidad del modelo para describir la disminución en la tasa de infiltración y estabilizarse en un valor constante lo convierte en una opción preferente para suelos que muestran este patrón.

En contraste, mientras que los modelos de Kostiakov y Green-Ampt también pueden describir variaciones en la tasa de infiltración con el tiempo, no están diseñados específicamente para capturar un comportamiento asintótico tan pronunciado. El modelo de Kostiakov se basa en una función potencial que puede no estabilizarse en una tasa constante, y el modelo de Green-Ampt, aunque tiene en cuenta factores como la porosidad y el potencial matricial, no representa inherentemente una caída exponencial en la tasa de infiltración.

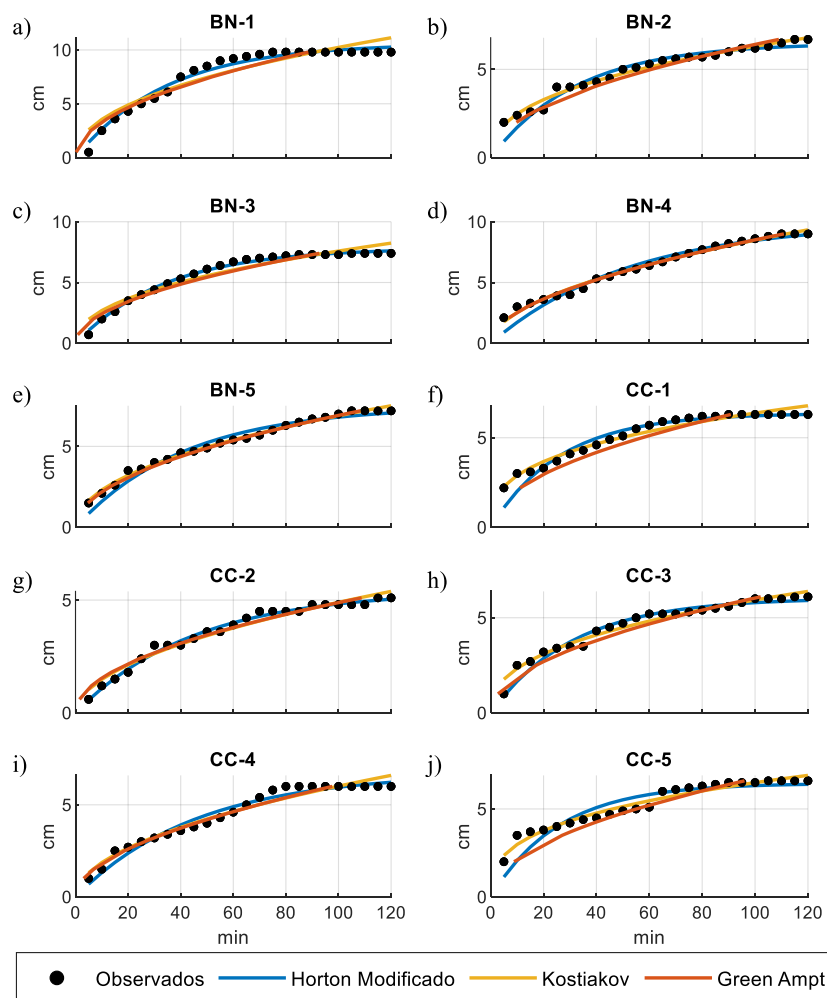


Figura 3. Ajuste de datos experimentales a modelos de infiltración

Por lo tanto, si los datos presentan un marcado comportamiento asintótico, el modelo de Horton es probablemente el más adecuado para representar dicha tendencia. Esta afinidad del modelo con el comportamiento asintótico realza la importancia de seleccionar el modelo correcto basado en la naturaleza y características observadas en los datos.

El modelo de Kostiakov, aunque tiene valores de R^2 ligeramente menores que el de Horton para el bosque natural, presenta un ajuste idéntico para el cultivo de coco. Esto sugiere que, mientras el modelo de Kostiakov también es capaz de representar adecuadamente el comportamiento de infiltración en estos suelos, podría haber algunas diferencias sutiles en cómo cada modelo se ajusta a las características específicas de cada tipo de uso del suelo.

Finalmente, el modelo de Green-Ampt tiene los valores más bajos de R^2 para ambos tipos de uso del suelo. Aunque todavía presenta un ajuste razonablemente bueno, indica que este modelo podría no ser tan preciso como los otros dos en la representación del proceso de infiltración en estos contextos particulares. Es posible que el modelo de Green-Ampt no capture tan eficientemente algunas características específicas del proceso de infiltración en estos suelos como lo hacen los modelos de Horton y Kostiakov.

4.1.3. Valores de infiltración de los modelos

Los valores promedios de infiltración, medidos en cm/h, presentan diferencias notables entre los modelos de Horton, Kostiakov y Green-Ampt, tal como se muestra en la **Tabla 2**. A través de los datos presentados, se observa que el modelo de Horton estima tasas de infiltración de 4.02 cm/h para el bosque natural y 2.99 cm/h para el coco. Por otro lado, el modelo de Kostiakov proyecta tasas ligeramente superiores, siendo 4.30 cm/h para el bosque natural y 3.21 cm/h para el coco. Sin embargo, es el modelo de Green-Ampt el que destaca con las tasas más elevadas: 8.77 cm/h y 6.66 cm/h para el bosque natural y el coco, respectivamente.

Tabla 2. Valores de infiltración (cm/h) en diferentes usos de suelos para los tres diferentes modelos trabajados

Modelos	Bosque Natural	Cultivo de coco
Horton	4.02 ± 0.35	2.99 ± 0.12
Kostiakov	4.3 ± 0.38	3.21 ± 0.14
Green Ampt	8.77 ± 0.77	6.66 ± 0.36

El modelo de Horton está fundamentado en la suposición de que la tasa de infiltración disminuirá con el tiempo, acercándose a un valor constante. Esta caracterización tiende a ser adecuada para muchas condiciones de suelo, especialmente cuando se observa un comportamiento asintótico en los datos experimentales (Horton, 1933). La congruencia entre los valores experimentales y las predicciones del modelo de Horton reafirma su aplicabilidad en estos contextos.

Kostiakov, por su parte, propone un modelo que relaciona la infiltración con el tiempo elevado a una potencia. Aunque este enfoque puede adaptarse a diversas formas de curvas de infiltración, puede no converger hacia un valor constante, lo que podría explicar las diferencias observadas con respecto a Horton (Kostiakov, 1932).

El modelo de Green-Ampt, con sus estimaciones superiores, se basa en una formulación que considera el frente de humedecimiento y parámetros asociados, como la porosidad y el potencial matricial (Green y Ampt, 1911). Este modelo tiende a ser más sensible a las características del suelo y a las condiciones iniciales de humedad, lo que puede justificar las tasas de infiltración más altas.

Al evaluar estas diferencias, es esencial comprender que no hay un modelo universalmente adecuado para todas las condiciones. Cada modelo tiene su origen en distintas conceptualizaciones y suposiciones sobre el proceso de infiltración. Las discrepancias entre las estimaciones de los modelos y los datos experimentales subrayan la importancia de seleccionar el modelo que mejor se adapte a las características y comportamientos observados del suelo en estudio.

4.2. Influencia del clima en la infiltración

En el análisis realizado, como se observa en la **Figura 4** se tiene una correlación de Pearson de -0.61571 entre la precipitación acumulada en 1 día y la tasa de infiltración. Esta correlación negativa moderada a fuerte sugiere que, a medida que aumentaba la precipitación acumulada, la tasa de infiltración tendía a disminuir. Esta tendencia se pudo haber originado debido a la saturación del suelo. Dunne y Leopold (1978) postularon que cuando un suelo recibe una cantidad significativa de agua en un corto período de tiempo, podría no ser capaz de infiltrar agua adicional a la misma tasa que cuando estaba más seco.

Desde una perspectiva hidrológica, esta correlación tiene implicaciones significativas. Un menor índice de infiltración durante episodios de alta precipitación implica que más agua se quedaba en la superficie, aumentando el riesgo de escorrentía. Esta agua superficial podría haber generado escorrentía, elevando el riesgo de inundaciones en zonas bajas, como se señaló en estudios de Chow, Maidment y Mays (1988). Además, la escorrentía superficial podría haber llevado consigo partículas de suelo, incrementando la erosión, especialmente en áreas donde la vegetación no era densa o estaba ausente, un fenómeno descrito por Morgan (2005).

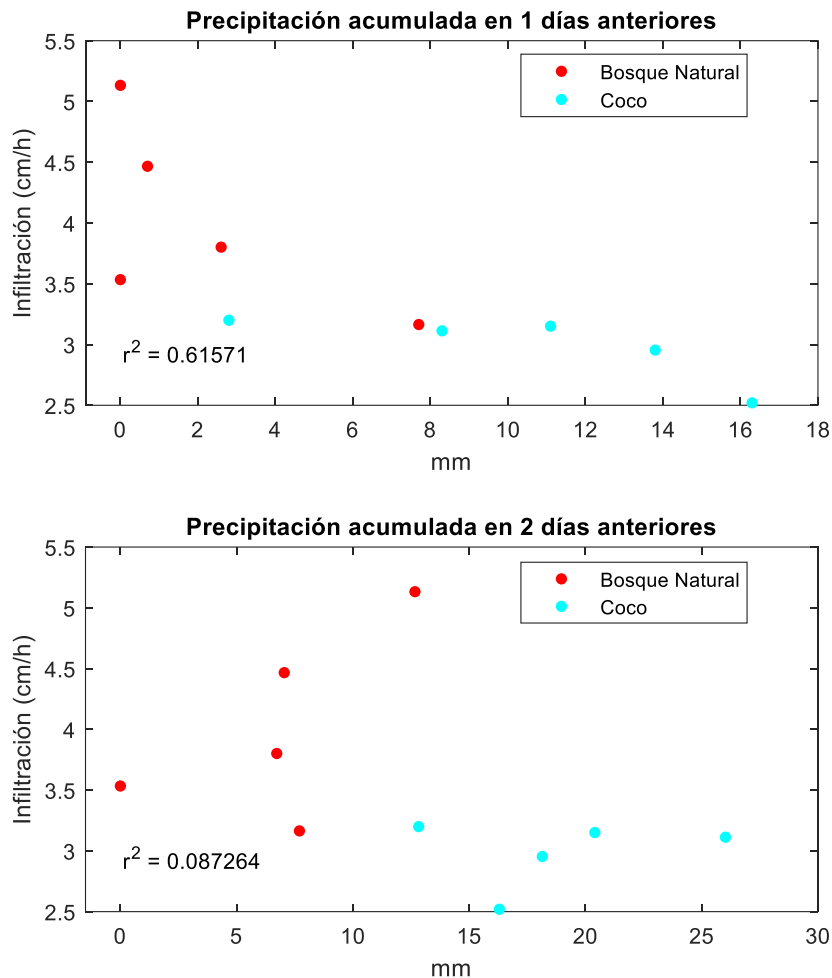


Figura 4. Correlación de las precipitaciones con la constante de infiltración

La correlación entre la infiltración la precipitación acumulada en días previos es un aspecto que resalta dentro del análisis. Se identifica que la precipitación acumulada en el día anterior puede dejar una humedad residual en el suelo, influyendo directamente en la infiltración medida el día siguiente. Eso explicaría la alta correlación entre las tasas de infiltración de Horton y el día anterior como se muestra en la **Figura 4**. Esta humedad residual afecta la capacidad de infiltración del suelo a corto plazo. Con el transcurso del tiempo, es probable que parte de esta humedad se evapore o se drene hacia capas más profundas, reduciendo su influencia en la infiltración (Rawls, Brakensiek, & Saxton, 1982). Eso explicaría porque la correlación con la precipitación de 2 días acumulados es prácticamente 0.

Además, se considera la evapotranspiración como un factor relevante en este comportamiento. Si el día posterior a un evento de precipitación es especialmente cálido o ventoso, podría llevarse a cabo una evaporación significativa del agua en el suelo, alterando su contenido al día siguiente y, por ende, la relación entre la infiltración y la precipitación acumulada en dos días (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

Por otro lado, la precipitación puede tener un impacto directo en la estructura del suelo. Un suelo recientemente humedecido podría experimentar cambios estructurales que favorezcan una infiltración más eficiente. No obstante, con el paso del tiempo, es posible que esta estructura experimente compactación o cambios adicionales debido a factores como el tráfico de animales o la acción gravitacional, afectando las tasas de infiltración (Hudson, 1994).

Por lo tanto, la relación entre la precipitación y la infiltración es una interacción compleja y multifacética, sujeta a diversos factores.

4.3. Relación de la infiltración con la granulometría

La **Tabla 3** presenta un conjunto de parámetros granulométricos y otros valores relacionados con la infiltración de suelos bajo dos usos diferentes: cultivo de coco y bosque natural. Se observa que las propiedades de ambos suelos son notablemente similares, lo que plantea la cuestión de qué factores adicionales podrían estar influyendo en las diferencias observadas en las tasas de infiltración.

Arena, Arcilla y Limo: Los suelos se componen principalmente de tres fracciones granulométricas: arena, arcilla y limo. La proporción de estas fracciones determina la textura del suelo. Aquí, ambos suelos son clasificados como "Franco", lo que indica una distribución equilibrada entre las tres fracciones. En general, los suelos arenosos promueven una alta infiltración debido a sus poros grandes, mientras que los suelos arcillosos, con poros más pequeños, tienden a tener tasas de infiltración más bajas (Brady y Weil, 2008). Dado que las proporciones son similares en ambos suelos, es probable que la textura no sea el principal factor que contribuya a la diferencia en las tasas de infiltración observadas.

Humedad: La humedad del suelo es otro factor crucial que influye en la infiltración. El suelo del bosque natural presenta una humedad del 12.41%, mientras que el suelo del cultivo de coco tiene una humedad del 10.63%. Aunque la diferencia es pequeña, los suelos más húmedos

pueden tener una capacidad de infiltración reducida debido a la menor disponibilidad de poros vacíos para el ingreso de agua (Hillel, 1998).

Densidad aparente: Es una medida de la compactación del suelo. Valores más altos indican un suelo más compacto, lo que puede reducir la infiltración. Aunque las densidades aparentes son muy similares (1.87 g/cm³ para el cultivo de coco y 1.86 g/cm³ para el bosque natural), es esencial considerar que incluso pequeñas diferencias en la compactación pueden influir en la infiltración, especialmente cuando otros parámetros son similares (Rawls et al., 1993).

Infiltración: A pesar de las similitudes en las propiedades del suelo, hay una diferencia notable en las tasas de infiltración. El suelo del bosque natural muestra una tasa de 4.01 cm/h, mientras que el cultivo de coco tiene una tasa de 3.01 cm/h. Dado que las propiedades granulométricas y la densidad aparente son similares, otros factores, como la estructura del suelo, el contenido orgánico o las prácticas de manejo, podrían estar influyendo en estas diferencias (Jury et al., 1991).

Tabla 3. Parámetros granulométricos de suelos de bosque natural y cultivo de coco y valores de la constante k de infiltración de Horton

Parámetros granulométricos	Uso de suelo	
	Cultivo de coco	Bosque natural
% Arena	30	28
% Arcilla	24	26
% Limo	47	47
Clase Textural	Franco	Franco
% Humedad	10.63	12.41
Densidad aparente (g/cm ³)	1.87	1.86
Infiltración (cm/h)	3.01	4.01

Considerando que la composición granulométrica es similar, se infiere que existen otros factores determinantes en las diferencias en las tasas de infiltración. Factores como la estructura del suelo, materia orgánica, actividad biológica, compactación, historia de uso del suelo y prácticas de manejo pueden influir significativamente en las características de infiltración (Johnson & Logan, 2007). Específicamente, la estructura del suelo puede influenciar en la formación de macroporos, facilitando una infiltración más rápida (Dexter, 2004). Además, la actividad de raíces y organismos en el suelo puede modificar la formación de canales y poros, afectando así las tasas de infiltración (Brady & Weil, 2008). Por ende, en

investigaciones sobre infiltración, es esencial abordar y considerar estos factores para comprender las diferencias entre diferentes usos del suelo.

4.4. Comparación de los niveles de infiltración en dos usos de suelo

La Tabla 4 muestra una prueba de t utilizada para evaluar si existen diferencias significativas en la infiltración entre dos sistemas de uso de suelo: bosque natural y cultivo de coco. A continuación, se discuten los resultados.

La media de infiltración en el sistema de bosque natural fue de 4.02 cm/h, mientras que en el cultivo de coco fue de 2.99 cm/h. Esta diferencia observada de aproximadamente 1.03 cm/h parece ser significativa dado el valor t de 2.78 y un p-valor de 0.024, que es menor que el umbral comúnmente aceptado de 0.05.

Según Hillel (1998), la infiltración de agua en el suelo es influenciada por diversos factores, entre los que se encuentran la textura del suelo, la estructura del suelo, la presencia de materia orgánica y las prácticas de manejo del suelo. La textura del suelo, que se refiere a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, es un determinante clave de la infiltración. Suelos con mayor contenido de arena generalmente presentan tasas de infiltración más rápidas en comparación con suelos arcillosos (Brady y Weil, 2008). En este caso, aunque ambos suelos se clasifican como francos y tienen porcentajes similares de arena, arcilla y limo, la tasa de infiltración es mayor en el bosque natural.

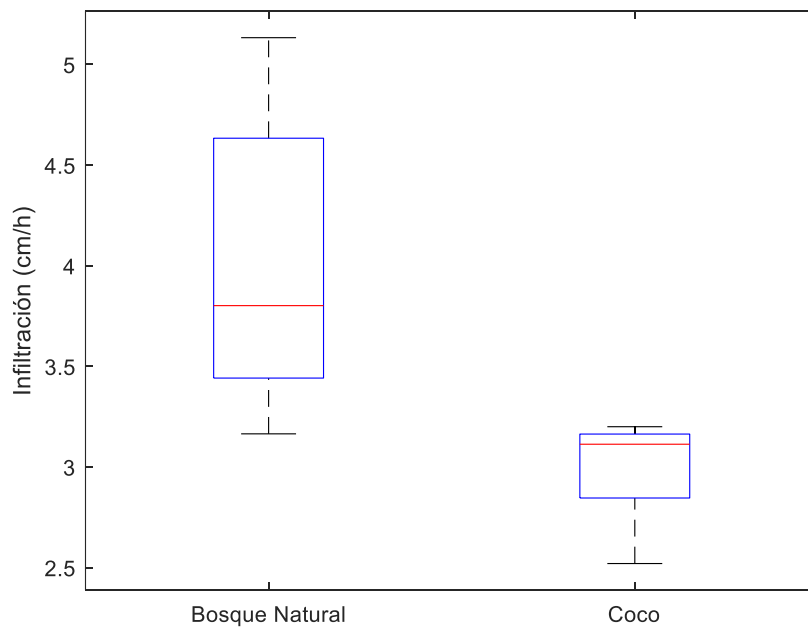
Esto podría estar relacionado con otros factores, como la estructura del suelo y la materia orgánica. La presencia de raíces y la descomposición de materia orgánica pueden mejorar la estructura del suelo, aumentando la porosidad y, por lo tanto, facilitando la infiltración de agua (Lal, 2006). Es probable que el bosque natural, con su vegetación autóctona y diversidad de especies, tenga una mejor estructura del suelo y mayor contenido de materia orgánica en comparación con el cultivo de coco.

Además, las prácticas agrícolas en el cultivo de coco pueden haber afectado negativamente la estructura del suelo, compactándolo y reduciendo su capacidad de infiltración. La compactación del suelo es una preocupación común en sistemas agrícolas y puede reducir significativamente la infiltración de agua (Horn et al., 1994).

En resumen, aunque la textura del suelo entre los dos sistemas es similar, otros factores como la estructura del suelo, el contenido de materia orgánica y las prácticas de manejo del suelo podrían explicar las diferencias observadas en las tasas de infiltración.

Tabla 4. Prueba de t para evaluar la diferencia de infiltración en dos sistemas de uso de suelo

Descripción	Valores
Grupo 1	Bosque Natural
Grupo 2	Coco
n(1)	5
n(2)	5
Media(1)	4.02
Media(2)	2.99
DE(1)	0.78
DE(2)	0.28
Diferencia de medias	1.03
IC 95% Diff (TBD)	-
Valor t	2.78
Grados de libertad	8
p-valor	0.024
Decisión	Rechazar H_0
Tipo de prueba	Bilateral

**Figura 5.** Diagrama de cajas de la infiltración en los dos sistemas de uso de suelo

V. CONCLUSIONES

El modelo de Horton fue el más adecuado para describir la infiltración en ambos tipos de suelo, reflejando mejor el comportamiento asintótico. Se determinó que el bosque natural tiene una mayor tasa de infiltración que el cultivo de coco, lo que puede atribuirse a diferencias en la estructura del suelo y la porosidad.

Se encontró una correlación negativa entre la precipitación acumulada y la tasa de infiltración, indicando que la humedad previa del suelo disminuye su capacidad de infiltración. Esto resalta la importancia de considerar la precipitación reciente al evaluar el riesgo de escorrentía e inundaciones.

A pesar de las similitudes en la composición granulométrica y la densidad aparente entre el suelo del bosque natural y el cultivo de coco, se observaron diferencias en las tasas de infiltración. Esto sugiere que otros factores, como la materia orgánica y la actividad biológica, pueden estar influyendo en la capacidad de infiltración del suelo.

La tasa de infiltración en el bosque natural fue significativamente mayor que en el cultivo de coco, con una diferencia promedio de 1.03 cm/h, lo que podría explicarse por una mejor estructura del suelo y un contenido más alto de materia orgánica en el bosque.

VI. RECOMENDACIONES

Para enriquecer el entendimiento de los niveles de infiltración en diferentes sistemas de uso del suelo en el sector Vista Alegre, Supte, es recomendable explorar una variedad más amplia de modelos de infiltración que consideren la recarga de aguas subterráneas. Este enfoque proporcionaría una comprensión más completa y matizada de la dinámica de infiltración. Además, profundizar en la relación entre la infiltración y factores climáticos como la evapotranspiración y la transpiración podría arrojar luz sobre su influencia directa en la infiltración en estos sistemas.

Un análisis exhaustivo de las propiedades del suelo, con énfasis en la materia orgánica, la granulometría, la porosidad y la conductividad hidráulica, permitiría identificar cómo estas características influyen en la infiltración del agua en el suelo. Este análisis ayudaría a explicar las diferencias en las tasas de infiltración observadas entre los suelos de bosque natural y los de cultivo de coco.

La expansión del estudio para abarcar una gama más diversa de tipos de uso de suelo enriquecería la comparación de las tasas de infiltración, permitiendo una evaluación más detallada y proporcionando datos relevantes para la gestión eficiente del uso del suelo y los recursos hídricos.

En cuanto a las prácticas de gestión, es crucial diseñar sistemas de drenaje eficientes para los cultivos de coco, evitando así problemas de encharcamiento y mejorando la infiltración. También se deben establecer regulaciones para la conservación de los bosques, que promuevan la sostenibilidad y mejoren la capacidad de infiltración del suelo. La reforestación y el mantenimiento de bosques deberían ser incentivados, ya que estos esfuerzos pueden mejorar la estructura del suelo y su capacidad de infiltración. Por último, la adopción de buenas prácticas agrícolas, como la rotación de cultivos y el manejo adecuado de residuos orgánicos, jugarían un papel esencial en la mejora de la calidad del suelo y en el aumento de su capacidad para infiltrar agua. Estas recomendaciones tienen como fin último optimizar la gestión de los recursos hídricos y del suelo en el sector Vista Alegre, Supte.

VII. REFERENCIAS

- Bajirao, T.S., Vishnu, P. (2023). "Comparative performance of different infiltration models for prediction of infiltration rate under different land-use conditions." *Environmental Earth Sciences*, 82, 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10808-3>
- Bhattacharyya, R., Kundu, S., Prakash, V., Gupta, H. S., & Pathak, H. (2008). Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 125(1-4), 93-102.
- Bonell, M., & Bruijnzeel, L. A. (2004). "Forests, Water and People in the Humid Tropics". Cambridge University Press.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). "The Nature and Properties of Soils" (14th ed.). Prentice Hall.
- Chan, E., & Elevitch, C.R. (2006). "Species Profiles for Pacific Island Agroforestry". Permanent Agriculture Resources (PAR).
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill.
- Chu, S.T. (1997). "Infiltration During an Unsteady Rain." *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(4), 165-170.
- Cruz, F. E. (2019). Mapeo y análisis de calidad física y química de los suelos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina aplicando herramientas SIG. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3939>
- Das, B. (2018). "Principles of Geotechnical Engineering." Cengage Learning.
- Dingman, S. L. (2002). "Physical Hydrology". Prentice-Hall.
- Dirksen, C. (1999). "Soil Physics Measurement". CRC Press.
- Failache, M. F., & Zuquette, L. V. (2021). "Soil water infiltration under different land use conditions: in situ tests and modeling." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210063>
- Gardner, W. R. (1960). "Dynamic aspects of water availability to plants". *Soil Science*.
- Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2010). Dynamics of soil water content in the rhizosphere. *Plant Soil*, 341(1-2), 1-15.
- Green, W.H., & Ampt, G.A. (1911). "Studies on Soil Physics, Part I – The Flow of Air and Water through Soils." *Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.
- Gupta, N., & Agarwal, S. (2020). "Impact of Land Use Change on Groundwater Recharge: A Global Perspective." *Journal of Hydrology*, 34(1), 78-89.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill.
- Hillel, D. (1998). "Environmental Soil Physics". Academic Press.
- Hillel, D. (2004). "Introduction to Environmental Soil Physics". Elsevier Academic Press.
- Horton, R.E. (1933). "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle." *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446-460.
- Jury, W.A., Gardner, W.R., & Gardner, W.H. (1991). *Soil Physics*. John Wiley & Sons.
- Kostiakov, A.N. (1932). "On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration." *Transactions 6th Commission International Society Soil Science, Part A*, 17-21.
- Kutfllek, M., & Nielsen, D. R. (1994). "Soil hydrology: Textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines". Catena Verlag.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). "Principles of Soil Physics". Marcel Dekker.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., & Burges, S.J. (2007). "A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for General Circulation Models." *Journal of Geophysical Research*, 99(D7), 14415-14428.
- Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). "Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils". *Soil Science Society of America Journal*.
- Liyanage, M. de S., & Dassanayake, K.B. (1990). "Coconut palm a monograph". ACIAR Monograph No. 8.
- Martínez, R. (2017). "Climatología de la Selva Alta del Perú." *Revista de Geografía*, 21(2), 49-62.
- Mishra, S.K., Singh, V.P., & Raghuwanshi, N.S. (2003). "Comparative Performance of Infiltration Models." *Water Resources Management*, 17(5), 395-412.
- Nepstad, D. C., de Carvalho, C. R., Davidson, E. A., Jipp, P. H., Lefebvre, P. A., Negreiros, G. H., ... & Vieira, S. (1994). "The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures". *Nature*, 372(6507), 666-669.
- Ohler, J.G. (1999). "Modern Coconut Management". IPGRI.

- Philip, J.R. (1957). "The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations." *Soil Science*, 84(3), 257-264.
- Pitts, D.J., Huffman, R.L., & Thompson, A.L. (1991). "Influence of Soil Compaction on Water Infiltration". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Quispe y Ynquiltupa (2022). "Influencia de la topografía, estudios de infiltración y propiedades mecánicas del suelo en la evaluación del factor de seguridad Del talud de la margen izquierda de la quebrada Ayahuayco, Cusco – 2022." <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/4943>
- Raghavan, V., & Magat, S.S. (1997). "Handbook on Coconut Palm". Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.
- Rasool, T., Dar, A.Q. & Wani, M.A. (2021). "Comparative Evaluation of Infiltration Models under Different Land Covers." *Water Resources*, 48, 624–634. <https://doi.org/10.1134/S0097807821040175>
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., & Saxton, K.E. (1982). "Estimation of Soil Water Properties." *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320.
- Reyes. P. C. (2014). Influencia de cuatro sistemas del uso de la tierra (teca, cítricos y café bajo sombra manejado y en abandono), en la sortividad en el IRD Selva Fundo La Génova, Chanchamayo, Junín. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2404>
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Clothier, B.E., 2002. "Physics of Water in Soil". *Soil Science Society of America Journal*, 66, 14-27.
- Saxton, K.E., & Rawls, W.J. (2006). "Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions". *Soil Science Society of America Journal*.
- Sene, K. J. (1999). "Hydrometeorology: Forecasting and Applications". Springer.
- Six, J., Elliott, E.T., & Paustian, K. (2002). "Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture". *Soil Biology and Biochemistry*.
- Smith, J., Johnson, L., & Brown, M. (2019). "Effects of Land-use Change on Soil Infiltration Rates: A Review." *Journal of Environmental Science*, 31(4), 125-134.
- Wallace, J.S. & Terry, A.C. (1998). "Handbook of Soil Water". CRC Press.
- Wang, Y., Zhao, Y., Chen, X., & Zhang, X. (2018). Effects of agricultural practices on soil infiltration rate: A review. *Journal of Hydrology*, 567, 78-89.

Wilson, C., & Grizzle, R. (2018). "Soil Erosion and Infiltration: A Review." *Soil Science*, 26(1), 44-55.

VIII. ANEXOS



Figura 6. Usos de suelo de Bosque



Figura 7. Usos de suelo de plantaciones de Coco



Figura 8. Muestreo de suelo de bosque



Figura 9. Muestreo de plantaciones de Coco



Figura 10. Muestras de suelo de bosque y de coco

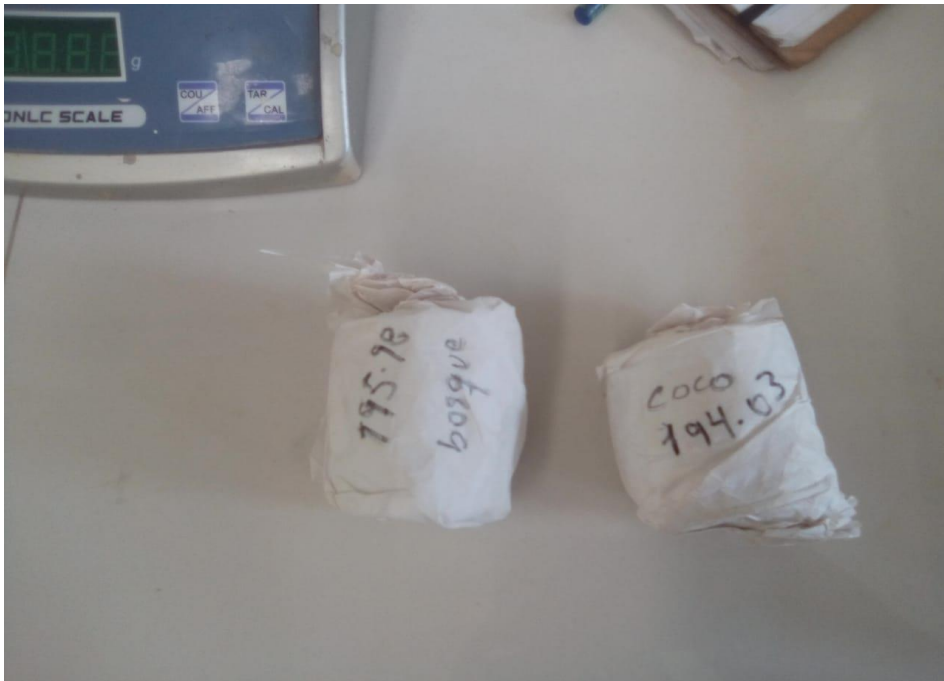


Figura 11. Muestras empaquetadas de suelo de bosque y de coco



Figura 12. Cilindro de doble anillo externo



Figura 13. Cilindro de doble anillo interno

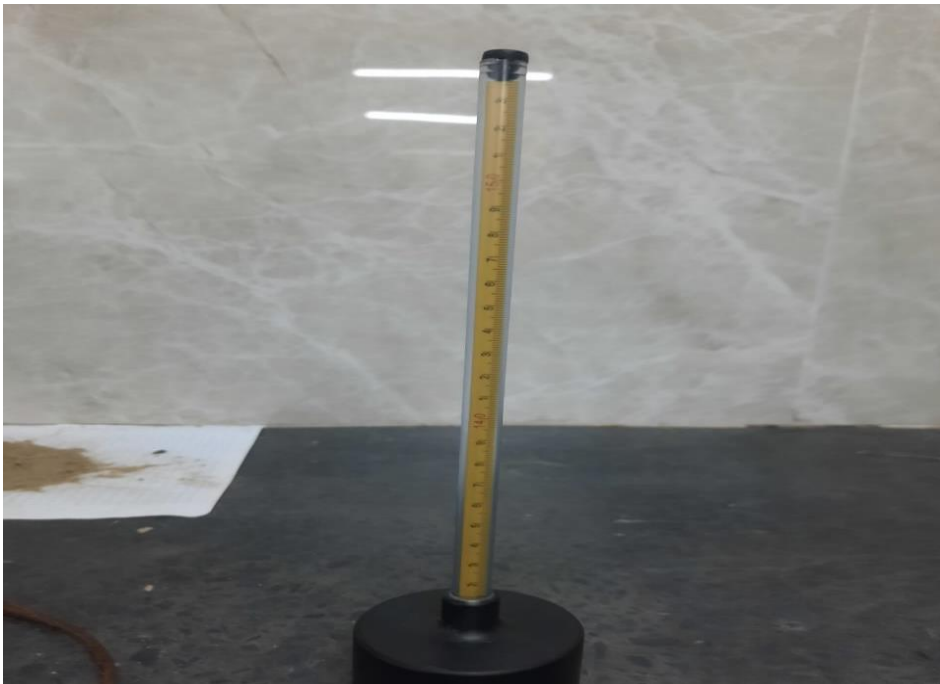


Figura 14. Regla flotadora



Figura 15. Martillo de goma para el cilindro infiltrómetro

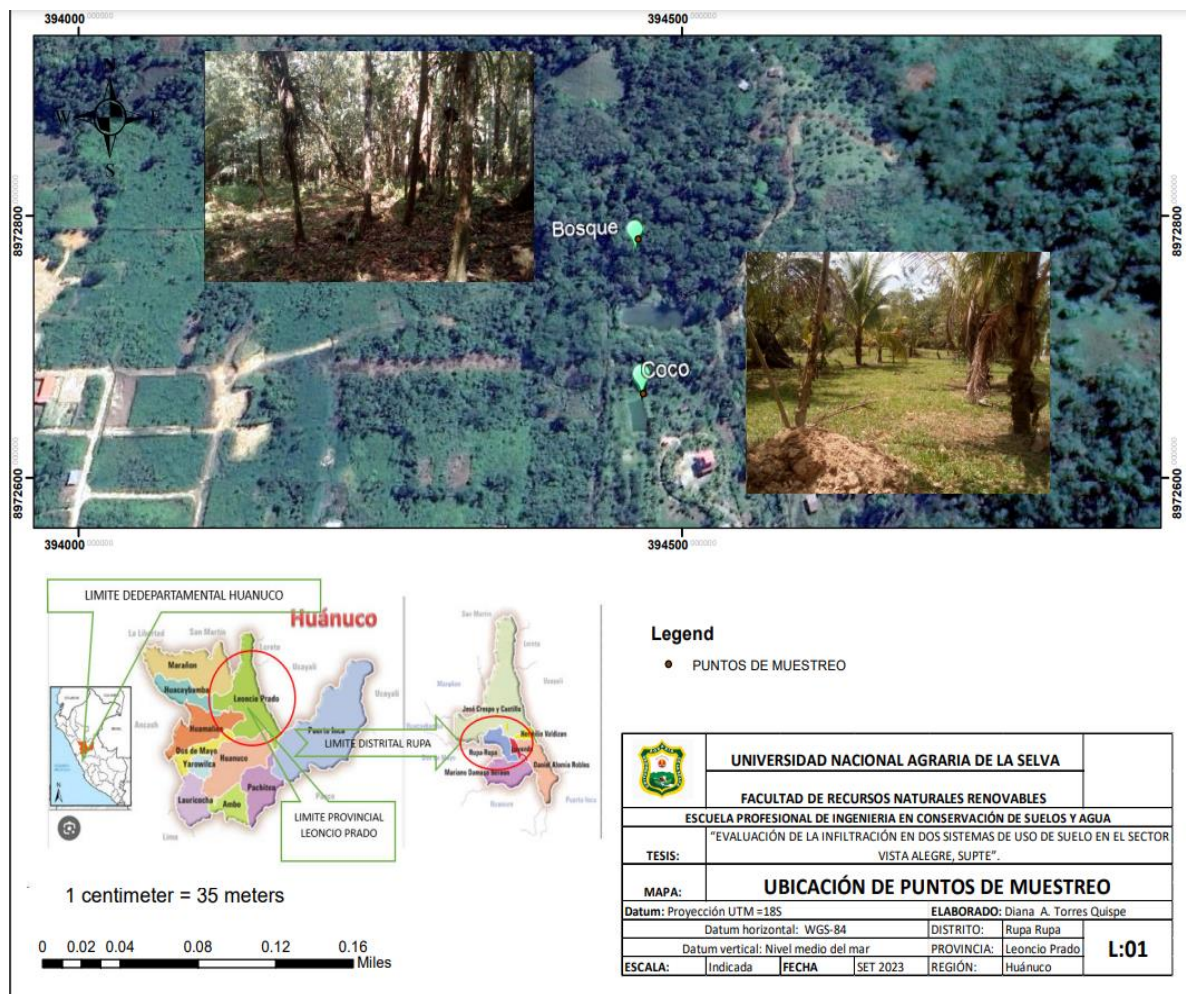


Figura 16. Mapa de ubicación de muestreo



ANÁLISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:	TORRES QUISPE DIANA ANTUANE	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE RECEPCION:	18/09/2023
PROVINCIA:	LEONCIO PRADO	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	18/09/2023
DISTRITO:	RUPA RUPA	FECHA DE REPORTE:	20/09/2023
LOCALIDAD:	TINGO MARÍA	RECIBO O FACTURA:	23398
CULTIVO	COCO Y BOSQUE	OBSERVACION:	-----

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				°H	Da
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural		
	CODIGO DEL LAB.	NUMERO DE ETIQUETA	%	%	%		%	(g/cm ³)
1	S1232 A	ÁREA DEL COCO H1	30	24	47	Franco	10.63	1.87
2	S1232B	ÁREA DEL BOSQUE H1	28	26	47	Franco	12.41	1.86

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ING. LUIS GERMIN MANSILLA MINAYA
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 17. Resultados del análisis granulométrico de suelos

