

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**COMPARACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS PARA MEDIR VELOCIDAD
DE INFILTRACIÓN EN EL SUELO**

JAVIERA CONSUELO FIERRO VILLAGRÁN

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN – CHILE

2025

**COMPARACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS PARA MEDIR VELOCIDAD
DE INFILTRACIÓN EN EL SUELO**

Aprobado por:

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemáticas, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Director de Departamento

Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Titular

Decano

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mamá y papá, cuya constante guía, apoyo y amor incondicional han sido fundamentales a lo largo de todo este proceso académico. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y el compromiso, por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino y por brindarme la confianza necesaria para seguir mis sueños.

Asimismo, me gustaría agradecer a mis queridas amigas Valentina y Krishna cuyo apoyo, compañía y cariño han sido esenciales durante todo este proceso. Gracias por ser un refugio de risas, motivación y complicidad en los momentos más desafiantes, no tengo palabras suficientes para expresar lo agradecida que estoy por su presencia en mi vida.

Importante destacar el inmenso agradecimiento a mi profesor guía José Luis Arumí por su constante ayuda y orientación no solo en este proceso de tesis, si no que durante toda esta etapa universitaria.

He de agradecer a su vez a Felipe Recabal del Laboratorio de Recursos Hídricos de la facultad por ayudarme enormemente y acompañarme en las mediciones, esta tesis no hubiera sido posible sin su ayuda.

Agradecer también al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), ya que fui becada al realizar este trabajo por el proyecto ANID/FONDAP/1523A0001.

ÍNDICE DE MATERIAS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	6
3.1. Definición de Infiltración y su Importancia.....	6
3.2. Velocidad de Infiltración.....	7
3.3. Series de Suelo.....	10
3.3.1. Serie Mebuca, franco.....	10
3.3.2. Serie Arrayán, franco limoso.....	10
3.3.3. Serie Quilmén, franco arcillo limosa.....	11
3.4. Métodos de Medición de la Infiltración.....	12
3.4.1. Cilindro de Doble Anilla.....	12
3.4.2. Infiltrómetro SATURO.....	14
3.4.3. Infiltrómetro de Leite.....	15
4. METODOLOGÍA.....	18
4.1. Revisión bibliográfica.....	18
4.2. Pruebas de infiltración.....	19
4.3. Análisis de datos.....	20
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5.1. Ventajas y Desventajas.....	21
5.1.1. Cilindro Doble Infiltrómetro.....	21
5.1.2. Infiltrómetro Saturo.....	22
5.1.3. Infiltrómetro de Leite.....	23
5.2. Pruebas de Infiltración.....	26
5.3. Discusión sobre las pruebas de infiltración.....	32
6. CONCLUSIÓN.....	34
7. BIBLIOGRAFÍA.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto		Página
Tabla 1.	Resumen comparativo de ventajas y desventajas teóricas para los tres equipos escogidos.....	25
Tabla 2.	Resumen de los datos obtenidos en las pruebas de infiltración realizadas con cada equipo en cada serie de suelo seleccionado.....	27
Tabla 3.	Valores promedios de velocidad de infiltración para cada serie de suelo.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cilindro doble anilla.....	13
Figura 2. Infiltrómetro SATURO.....	15
Figura 3. Infiltrómetro de Leite.....	17
Figura 4. Series de suelo Mebuca, Arrayán y Quilmén ubicadas en la Universidad de Concepción Campus Chillán.....	18
Figura 5. Infiltrómetro SATURO, infiltrómetro de Leite y cilindro doble anilla en prueba de infiltración.....	20
Figura 6. Gráfico de dispersión de datos de velocidad de infiltración para cada prueba de infiltración realizada con cada equipo	27
Figura 7. Gráfico de columnas agrupadas para comparar los valores promedios de velocidad de infiltración de cada equipo de acuerdo con las series de suelo.....	30

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Ecuación de Richards.....	8
Ecuación 2. Igualación de velocidad de infiltración a conductividad hidráulica saturada.....	9
Ecuación 3. Ley de Darcy.....	12
Ecuación 4. Carga de agua infiltrada en los anillos para el infiltrómetro de Leite.....	16

COMPARACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS PARA MEDIR VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN EL SUELO

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR MEASURING INFILTRATION RATE IN SOIL

Palabras claves: Velocidad de infiltración, Infiltrómetro de Leite, Infiltrómetro Saturo, Cilindro doble anilla, Variabilidad del suelo.

RESUMEN

La medición de la velocidad de infiltración es esencial para la gestión eficiente del agua en la agricultura, la recarga de acuíferos y otras actividades relacionadas con el uso del suelo. Este estudio evaluó tres equipos para medir la velocidad de infiltración en suelos de diferentes características, estos equipos fueron: el infiltrómetro de Leite, el infiltrómetro Saturo y el cilindro de doble anilla. Se realizaron pruebas en tres series de suelos de la Universidad de Concepción, campus Chillán, para comparar la precisión y aplicabilidad de cada equipo en condiciones de terreno, los cuales se llaman Mebuca, Arrayán y Quilmén. Los resultados mostraron que el infiltrómetro Saturo es el más preciso y eficiente, aunque con un costo elevado. El infiltrómetro de Leite, de bajo costo y fácil instalación, presentó limitaciones en su precisión, mientras que el cilindro de doble anilla, aunque fue útil, requirió más esfuerzo y precisión. Este trabajo destaca la importancia de considerar la variabilidad del

suelo y las características específicas de cada equipo al elegir el método más adecuado para medir la infiltración.

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR MEASURING INFILTRATION RATE IN SOIL

Keywords: Infiltration rate, Leite infiltrometer, Saturo infiltrometer, Double ring cylinder, Soil variability.

ABSTRACT

The measurement of infiltration rate is essential for efficient water management in agriculture, aquifer recharge, and other soil related activities. This study evaluated three devices for measuring infiltration rate in soils with different characteristics: the Leite infiltrometer, the Saturo infiltrometer, and the double ring cylinder. Tests were conducted on three soil series from the University of Concepción, Chillán campus, namely Mebuca, Arrayán, and Quilmén, to compare the precision and applicability of each device under field conditions. The results showed that the Saturo infiltrometer was the most accurate and efficient, although it comes with a high cost. The Leite infiltrometer, which is low-cost and easy to install, showed limitations in its precision, while the double ring cylinder, although useful, required more effort and precision. This study highlights the importance of considering soil variability and the specific characteristics of each device when selecting the most appropriate method for measuring infiltration.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de la velocidad de infiltración es importante para la gestión eficiente del agua en la agricultura, la recarga de acuíferos y otras actividades silvoagropecuarias. La infiltración, que se refiere a la velocidad con la que el agua penetra en el suelo, depende de una serie de factores como la textura del suelo, la cantidad de agua disponible y las características del sistema de riego utilizado. La medición de la velocidad de infiltración permite optimizar el riego, controlar la erosión del suelo y gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente.

Una de las herramientas más comunes para medir la velocidad de infiltración es el cilindro doble anilla, un dispositivo que permite estimar la cantidad de agua que se infiltra verticalmente en el suelo en un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, existen otros tipos de infiltrómetros, como el infiltrómetro Saturo y el infiltrómetro de Leite por lo que una de las principales preguntas de este estudio es ¿Cuál es la diferencia entre los distintos equipos de medición de infiltración? Esto puede abordarse metodológicamente a través de la caracterización y prueba de los equipos, además de la identificación de sus ventajas y desventajas, para entender cómo las diferencias en el diseño y operación de estos equipos pueden influir en factores como la accesibilidad al terreno, los costos y la precisión de las mediciones.

Este documento analiza qué es la infiltración y su importancia, las ecuaciones utilizadas para su cálculo, su relación con la velocidad de infiltración, y se evalúan tres métodos de medición en terreno.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar tres métodos para medir velocidad de infiltración en condiciones de terreno.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar las mediciones de velocidad de infiltración entre los equipos Saturo, infiltrómetro de Leite y el cilindro de doble anilla.
- Establecer ventajas y desventajas teóricas del uso de los equipos infiltrómetros.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Definición de Infiltración y su Importancia

La infiltración se refiere al proceso mediante el cual el agua penetra en la superficie del suelo y se mueve hacia las capas inferiores, impulsada por la gravedad y la tensión capilar. Este proceso es crucial para recargar acuíferos, evitar el escurrimiento superficial y suministrar agua a las plantas. La infiltración también juega un papel clave en la dinámica de los ecosistemas agrícolas y naturales al influir en la distribución del agua en el perfil del suelo (Selker, 2020).

La infiltración depende de múltiples factores, tales como la textura del suelo, la estructura del suelo, el contenido de materia orgánica, la presencia de macroporos y las condiciones meteorológicas. Además, la vegetación y el manejo de la superficie del suelo son determinantes importantes. Por ejemplo, la compactación del suelo, común en áreas urbanas o agrícolas intensivas, puede reducir la infiltración, lo que genera un aumento en el escurrimiento superficial y la erosión del suelo (Pasternack, 2020).

3.2. Velocidad de Infiltración

La velocidad de infiltración se refiere a la tasa a la cual el agua penetra en el suelo. Esta tasa varía durante los eventos de lluvia o riego, empezando con una velocidad alta que disminuye conforme el suelo se satura.

Pasternack (2020) explica que la velocidad de infiltración está altamente influenciada por la presencia de macroporos y capas compactadas en el suelo. Los macroporos, a menudo formados por raíces o actividad de fauna del suelo, permiten una rápida infiltración de agua en las capas profundas del suelo, mientras que la compactación reduce drásticamente esta velocidad.

Selker (2020) enfatiza que la velocidad de infiltración no solo depende de las características físicas del suelo, sino también del manejo agrícola y las condiciones climáticas previas. La velocidad inicial de infiltración es mayor en suelos secos, pero disminuye rápidamente cuando el suelo se aproxima a la saturación, alcanzando una tasa constante que depende de la conductividad hidráulica del suelo.

La ecuación de Richards describe el movimiento del agua en suelos no saturados y es la combinación de la ley de Darcy (Ec. 3) y la ecuación de continuidad. En su forma unidimensional para flujo vertical descendente, esta ecuación se expresa como:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta z} \left[K(\theta) \left(\frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) \right] \quad [1]$$

Donde:

- θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo.
- t es tiempo.
- z es profundidad positiva hacia abajo.
- $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica dependiente de θ .
- h es potencial mátrico del agua en el suelo.
- $\frac{\delta h}{\delta z}$ es el gradiente del potencial mátrico (componente de succión).
- 1 es el componente gravitacional (si el flujo es vertical descendente).

Esta expresión, según Cushman (1999) indica que el flujo de agua está determinado por el gradiente hidráulico total que incluye una componente de succión $\left(\frac{\delta h}{\delta z}\right)$ y una componente gravitacional unitaria. En suelos secos, el gradiente del potencial mátrico es alto, lo que provoca una velocidad de infiltración inicial elevada. A medida que el agua ingresa al suelo, el frente húmedo, es decir, la zona de transición entre el suelo seco y húmedo se va desplazando hacia abajo, y el valor del potencial mátrico en la superficie aumenta, acercándose a cero. Este proceso implica una disminución progresiva del gradiente $\frac{\delta h}{\delta z}$, el cual se estabiliza a medida que la zona superficial del suelo se satura completamente. Cuando esto ocurre, el valor de

h se vuelve constante en la zona cercana a la superficie, lo que hace que $\frac{\delta h}{\delta z}$ tienda a cero, y por lo tanto, el flujo se controla exclusivamente por la gravedad. En ese caso, la velocidad de infiltración ($i(t)$) se iguala a la conductividad hidráulica saturada (K_s), como se indica en la siguiente expresión (Cushman, 1999).

$$i(t) = -K(\theta) \left(\frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) \quad [2]$$

Este comportamiento justifica por qué las mediciones de infiltración no deben realizarse en los primeros minutos del ensayo, sino que deben prolongarse por al menos una hora y media, para asegurar que el flujo haya alcanzado condiciones cuasi-estacionarias y se esté midiendo efectivamente K_s . En las fases iniciales de la infiltración, el flujo está dominado por la succión del suelo seco, lo que genera velocidades de infiltración transitorias más altas. Sin embargo, a medida que el frente húmedo avanza y la zona superficial se satura, se alcanza una condición de flujo estable. Es por eso por lo que estas mediciones deben realizarse durante un tiempo prolongado, pues solo así se puede obtener un valor representativo y confiable de la conductividad hidráulica saturada del perfil de suelo.

3.3. Series de Suelo

3.3.1. Serie Mebuca, franco

La serie Mebuca pertenece a la familia arcillosa, mixta, térmica de los Aquic Haploxerolls (Mollisol). Se encuentra en suelos desarrollados sobre unidades geomorfológicas denominadas Abanico de San Carlos (sector suroriente) y Abanico de Chillán, ubicándose en posiciones bajas, planas o ligeramente cóncavas, generalmente sobre la variante aluvial de la serie Quilmén.

Las principales características de estos suelos son que poseen una profundidad moderada a alta, con drenaje imperfecto y un color pardo rojizo oscuro con concentraciones arcillosas de color rojo oscuro, también tienen una textura franco-arcillosa en los primeros 50 a 60 cm y arcillosa en profundidad, además de poseer una estructura bien definida, con presencia de concreciones que se hacen más frecuentes en la parte inferior del perfil. Este tipo de suelo tiene una permeabilidad lenta y escurrimiento superficial moderadamente rápido por que se tienen limitaciones en su drenaje y permeabilidad lo que influye en su manejo agrícola y su capacidad de retención de agua (CIREN, 1999).

3.3.2. Serie Arrayán, franco limoso

La serie Arrayán pertenece a la familia medial, térmica de los Typic Melanoxerands (Andisol) y se ha formado a partir de cenizas volcánicas recientes depositadas sobre un sustrato no relacionado, compuesto por tobas,

materiales fluviales y fluvioglaciales. Son suelos compactados, pero no cementados, con una permeabilidad lenta pero no impermeable, profundos y bien drenados, donde predomina una textura de suelo franco limosa. Presentan buena estructura en superficie, aunque esta se debilita en profundidad, y su consistencia friable a muy friable permite un buen arraigamiento radicular en todo el perfil. En cuanto a su coloración, los primeros 60-70 cm son pardo rojizo oscuro, seguidos de un horizonte pardo oscuro en profundidad, mientras que la parte baja del subsuelo adquiere tonalidades pardo amarillento o rojo amarillento. Se encuentran en topografía plana o casi plana, con una permeabilidad moderada y un escurrimiento superficial lento (CIREN, 1999).

3.3.3. Serie Quilmén, franco arcillo limosa

La serie Quilmén pertenece a la familia fina, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (Inceptisol) y se caracteriza por presentar características vérticas, lo que impide diferencias marcadas en los pedones debido al movimiento de las arcillas montmorilloníticas. Se considera que estos suelos se derivan de tobas volcánicas depositadas en ambientes de aguas tranquilas, posiblemente lacustres. Son suelos profundos, arcillosos, no estructurados (macizos), de permeabilidad lenta y drenaje imperfecto a moderado, generalmente sin nivel freático desde principios de primavera hasta avanzado el otoño. Suelen encontrarse en topografía plana con pendientes entre 0 y 2 % (CIREN, 1999).

3.4. Métodos de Medición de la Infiltración

Existen varios métodos para medir la infiltración, cada uno con sus propias aplicaciones y limitaciones. A continuación, se describen tres de los métodos más utilizados en campo:

3.4.1. Cilindro de Doble Anilla

El cilindro de doble anilla es un dispositivo estándar para medir la infiltración vertical en campo. Consiste en dos anillos concéntricos que se insertan en el suelo. El anillo interior mide la infiltración, mientras que el anillo exterior minimiza el flujo lateral, garantizando que la medición refleje principalmente el flujo vertical. Este método es particularmente útil para obtener mediciones precisas de la conductividad hidráulica del suelo.

La medición se realiza llenando ambos anillos con agua y registrando el tiempo que tarda en infiltrarse una cantidad específica. La velocidad de infiltración se calcula utilizando la ley de Darcy, que describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso:

$$q = K \frac{dh}{dx} \quad [3]$$

Donde:

- q es la velocidad del flujo de agua.
- K es la conductividad hidráulica del suelo.
- $\frac{dh}{dx}$ es el gradiente hidráulico (Darcy, 1856).

El volumen de agua necesario para este proceso depende de la permeabilidad del suelo, pero generalmente, se requieren entre 5 y 10 litros de agua por prueba (dependiendo del tamaño del anillo y la textura del suelo).

El costo de un cilindro de doble anilla varía entre 100 USD y 500 USD dependiendo del tamaño y los materiales de fabricación. Las versiones más avanzadas que incluyen medidores de presión y otros accesorios pueden costar más.



Figura 1. Cilindro doble anilla.

3.4.2. Infiltrómetro SATURO

El infiltrómetro SATURO es un dispositivo automatizado diseñado para medir la infiltración y la conductividad hidráulica saturada del suelo. Este equipo aplica presiones controladas en el suelo para simular diferentes condiciones de infiltración y registrar los datos en tiempo real. El sistema se basa en una cámara hermética conectada a un cilindro de infiltración; en la cámara se dispone el volumen de agua a infiltrar, que se alimenta de un estanque plástico mediante tuberías; sobre el agua se genera una burbuja de aire que está alimentada al compresor del equipo. El sistema utiliza un control automatizado que ajusta las presiones del aire mediante el compresor, permitiendo medir los ingresos de agua a la cámara en función de las variaciones de la infiltración. SATURO permite realizar mediciones rápidas y continuas, eliminando la necesidad de supervisión constante, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para estudios hidrológicos avanzados (METER Group, 2020).

Se necesitan entre 11 y 38 litros de agua por medición, dependiendo del tamaño del área a medir y la textura del suelo.

El costo de este equipo puede variar entre 3500 USD y 5000 USD dependiendo de la versión y características adicionales como la automatización y el software de análisis.



Figura 2. Infiltrómetro SATURO, cámara hermética a la derecha y estanque plástico a la izquierda.

3.4.3. Infiltrómetro de Leite

Este infiltrómetro utiliza un sistema de presión controlada para medir la infiltración. Este infiltrómetro tiene una estructura sencilla que consiste en un recipiente de agua y un tubo hermético conectado a un sensor de presión de aire. En la parte superior del tubo hermético queda una burbuja de aire, cuya presión disminuye en la medida que el agua infiltra y la burbuja se expande. El cambio de presión se correlacionó con el flujo de agua que se infiltra en el suelo. Este sistema es particularmente útil en estudios de campo debido a su simplicidad y bajo costo, lo que permite obtener mediciones precisas con un equipo ligero y de fácil transporte (Leite et al., 2024).

Para medir la presión del aire se usó un sensor HOB0 U20L-01 con Datalogger que además permite medir la temperatura. Los datos se almacenan en el

HOBO U20L-01, que luego pueden descargarse y analizarse para calcular la infiltración en función de la variación de la humedad y la presión.

Se requiere entre 2 y 5 litros de agua por prueba, dependiendo del tipo de suelo y la velocidad de infiltración. El equipo debe instalarse sobre un anillo para permitir el ingreso de agua al suelo y mantener la hermeticidad del tubo infiltrómetro (Figura 3).

La carga de agua infiltrada en los anillos (Δi ; mm) por este equipo se calcula de la siguiente manera (Leite et al., 2024):

$$\Delta i = \Delta h * \frac{r^2}{R^2} \quad [4]$$

Donde:

- Δi es la carga de agua infiltrada en los anillos.
- Δh son los cambios en el nivel de agua.
- r es el radio interno de la reserva del infiltrómetro.
- R es el radio interno del anillo.

El costo aproximado de este equipo completo es de 430 USD a 500 USD, considerando que el HOBO U20L-01 por sí solo tiene un costo aproximado de 360 USD.



Figura 3. Infiltrómetro de Leite.

4. METODOLOGÍA

4.1. Revisión bibliográfica

Para desarrollar el objetivo general se escogió y caracterizó según la publicación del CIREN (1999) tres series de suelos diferentes ubicados en la Universidad de Concepción Campus Chillán, los cuales corresponden a las series Mebuca (franco), Arrayán (franco limoso) y Quilmén (franco arcillo limoso), localizadas precisamente en las facultades de Ingeniería Agrícola, Agronomía y Veterinaria, respectivamente.



Figura 4. Series de suelo Mebuca, Arrayán y Quilmén ubicadas en la Universidad de Concepción Campus Chillán.

Para lograr los objetivos específicos se describió el funcionamiento del infiltrómetro de Leite según Leite et al., (2024), junto con las descripciones del infiltrómetro Saturo en el manual “Saturo infiltrometer: Manual” de METER Group y las del cilindro doble anilla en publicaciones de la plataforma Google Académico, este último ya que fue utilizado como un punto de comparación, al ser este un método popular y más antiguo.

Para el segundo objetivo específico, se buscó establecer ventajas y desventajas teóricas del uso de los equipos infiltrómetros según la bibliografía consultada.

4.2. Pruebas de infiltración

A partir de los conocimientos previos obtenidos en la revisión bibliográfica y con el fin de lograr el primer objetivo específico, se realizaron pruebas en cada serie de suelo donde se utilizaron los infiltrómetros de Leite, Saturo y cilindro doble anilla para medir velocidad de infiltración. Con cada equipo se tomaron un mínimo de 3 mediciones en cada serie de suelo escogida y se determinó si existen diferencias significativas entre ellos mediante un gráfico de dispersión.

Las pruebas que dieron resultados dudosos se repitieron, como por ejemplo si el rango de error era más grande que la medición propia o si se debían realizar muchos rellenos de agua durante la prueba en el cilindro. Estas repeticiones se hicieron para evitar la presencia de macroporos o toscas impermeables que pudieran afectar las pruebas de infiltración y así, utilizar el supuesto de un suelo homogéneo.



Figura 5. Infiltrómetro SATURO, infiltrómetro de Leite y cilindro doble anilla en prueba de infiltración.

4.3. Análisis de datos

La visualización de datos se hizo mediante un gráfico de dispersión que muestra la relación entre mediciones de velocidad de infiltración obtenidas de los 3 equipos utilizados donde se pueden identificar tendencias, patrones y valores atípicos en los datos. Además, se hizo un gráfico de columnas agrupadas para enseñar los valores promedio de velocidad de infiltración de cada equipo en cada serie de suelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Ventajas y Desventajas

5.1.1. Cilindro Doble Infiltrómetro

Ventajas:

- Precisión alta: Es uno de los métodos más precisos para medir la infiltración en suelos con baja permeabilidad.
- Adecuado para suelos no homogéneos: Debido a su diseño de anillos concéntricos, permite minimizar los efectos de la variabilidad del suelo.
- Método de referencia: Utilizado como estándar en muchas investigaciones debido a su fiabilidad.

Desventajas:

- Requiere gran cantidad de agua: El consumo de agua es considerable, especialmente para suelos de alta permeabilidad. Esto es un problema al ir a medir lugares que no tienen buen acceso, ya sea al agua o al transporte de esta.
- Tiempo de medición largo: Las pruebas pueden tardar varias horas o incluso días, dependiendo del tipo de suelo.
- Difícil de usar en suelos altamente compactados: No es tan efectivo para suelos con alto porcentaje de arcilla o compactación.

5.1.2. Infiltrómetro Saturo

Ventajas:

- **Automatización:** El sistema automatiza el proceso de medición, lo que reduce el error humano y el tiempo de operación.
- **Alta precisión:** Ofrece lecturas rápidas y precisas de la conductividad hidráulica saturada y de la velocidad de infiltración.
- **Apto para suelos de alta variabilidad:** Su diseño le permite adaptarse a suelos con variabilidad en la infiltración, proporcionando resultados más confiables.

Desventajas:

- **Costo elevado:** El precio de adquisición es considerablemente alto en comparación con otros métodos de medición.
- **Requiere formación:** El uso adecuado del equipo y la interpretación de los datos pueden requerir entrenamiento especializado para la persona que lo manipule.
- **No siempre adecuado para suelos muy finos o extremadamente gruesos:** Su precisión puede disminuir en condiciones extremas de textura de suelo.

5.1.3. Infiltrómetro de Leite

Ventajas:

- **Bajo costo:** Es mucho más accesible que otros métodos de infiltración, lo que lo hace ideal para trabajos de campo con presupuesto limitado (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).
- **Fácil de usar:** Su diseño lo hace sencillo de implementar sin necesidad de habilidades especializadas en hardware o programación, lo que lo hace accesible a investigadores y técnicos de campo con pocos recursos o experiencia en tecnología avanzada (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).
- **Portabilidad:** Es un equipo liviano y fácil de transportar, lo que es ideal para estudios en campo remoto (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).
- **Flexibilidad en el manejo de datos:** Aunque no tiene capacidades de procesamiento de datos integrados, el uso de hojas de cálculo y códigos R para análisis de datos permite una gran flexibilidad en el manejo y análisis de los datos. Los usuarios pueden realizar análisis exploratorios según sus necesidades y ajustar el enfoque según el contexto del estudio (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).
- **Múltiples pruebas de infiltración:** El sistema permite analizar múltiples pruebas de infiltración a la vez, facilitando la recolección y comparación

de datos de manera eficiente, lo cual es ventajoso en estudios que requieren la medición de infiltración en varias ubicaciones o condiciones del suelo (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).

- Integración con el sensor HOBO: Permite la medición automatizada de la humedad y la temperatura del suelo durante las pruebas, lo que mejora la precisión de los datos.

Desventajas:

- Menor precisión: Aunque es efectivo en suelos con moderada infiltración, no es tan preciso como equipos más avanzados como el Saturo (Leite, Di Prima, Schmidt, & Wilcox, 2024).
- Falta de procesamiento de datos integrado: A diferencia de sistemas más avanzados como el SATURO, este infiltrómetro no tiene capacidad de procesamiento de datos integrado, lo que significa que los datos deben ser procesados externamente, lo cual puede consumir más tiempo y requiere intervención manual.
- Requiere análisis posterior: El sistema requiere un análisis de datos posterior a la medición, lo que puede retrasar la obtención de resultados finales. En sistemas automatizados y más complejos, este proceso es realizado internamente, lo que facilita y acelera el flujo de trabajo.
- No tiene características avanzadas: Aunque el sistema es adecuado para pruebas de infiltración estándar, no cuenta con las características

avanzadas que otros equipos más complejos como el SATURO ofrecen, tales como la automatización completa del proceso, la medición continua sin intervención, y la generación de resultados en tiempo real.

- Limitado para suelos con alta variabilidad: Su efectividad disminuye en suelos extremadamente variables o con características muy complejas. Tiene capacidad limitada para realizar mediciones en suelos altamente permeables.

Tabla 1. Resumen comparativo de ventajas y desventajas teóricas para los tres equipos escogidos.

Equipo	Ventajas	Desventajas
Cilindro Doble Anilla	Alta precisión, adecuado para suelos con baja permeabilidad y no homogéneos.	Gran consumo de agua, tiempo de medición largo y difícil de usar en suelos altamente compactados.
Infiltrómetro Saturo	Automatizado, alta precisión, ideal para suelos con alta variabilidad.	Alto costo, requiere de formación en usuario, no siempre es adecuada en suelos muy finos o muy gruesos.
Infiltrómetro de Leite	Bajo costo, fácil de usar, portátil, permite análisis exploratorio y utiliza sensor HOBO para mejorar precisión.	Menor precisión, requiere análisis posterior, no tiene procesamiento integrado, limitado para suelos con alta variabilidad.

5.2. Pruebas de Infiltración

Todas las mediciones se realizaron sobre césped corto con los 3 equipos midiendo de manera simultánea, separados a una distancia no mayor a 2,5 metros, donde cada prueba tuvo una duración de una hora y treinta minutos aproximadamente, esto debido a la recomendación del manual del Saturo para suelos húmedos franco limosos (“wet silt loam”), ya que las 3 series de suelo escogidas eran de textura principalmente franca, además, la temporada en que se llevó a cabo la medición fue otoño-invierno donde la mayoría de las pruebas se realizaron entre las 10 am a 14 pm, horario en que se observó mucha presencia de rocío que junto a las bajas temperaturas mantenían el suelo húmedo.

Cabe destacar que en la serie de suelo Mebuca se repitieron algunas mediciones, debido a que algunas zonas donde se hicieron las pruebas tenían intervenciones hechas previamente en prácticos de laboratorio, además de que se midió en una zona en la cual se regaba todos los días y otra donde no se regaba. La serie de suelo Quilmén poseía el césped más corto y controlado a causa de animales que pastoreaban en esa zona regularmente.

Tabla 2. Resumen de los datos obtenidos en las pruebas de infiltración realizadas con cada equipo en cada serie de suelo seleccionado.

	Saturo (cm/h)	Doble Cilindro (cm/h)	Leite (cm/h)	Serie Suelo
S1	2,29	2,00	0,26	Mebuca
S2	1,85	3,20	1,75	Mebuca
S3	6,51	10,40	4,09	Mebuca
S4	1,75	2,00	3,35	Arrayán
S5	2,50	2,40	1,52	Arrayán
S6	1,91	2,40	2,16	Arrayán
S7	1,50	3,20	1,98	Quilmén
S8	1,48	3,60	3,31	Quilmén
S9	1,09	2,00	0,75	Quilmén

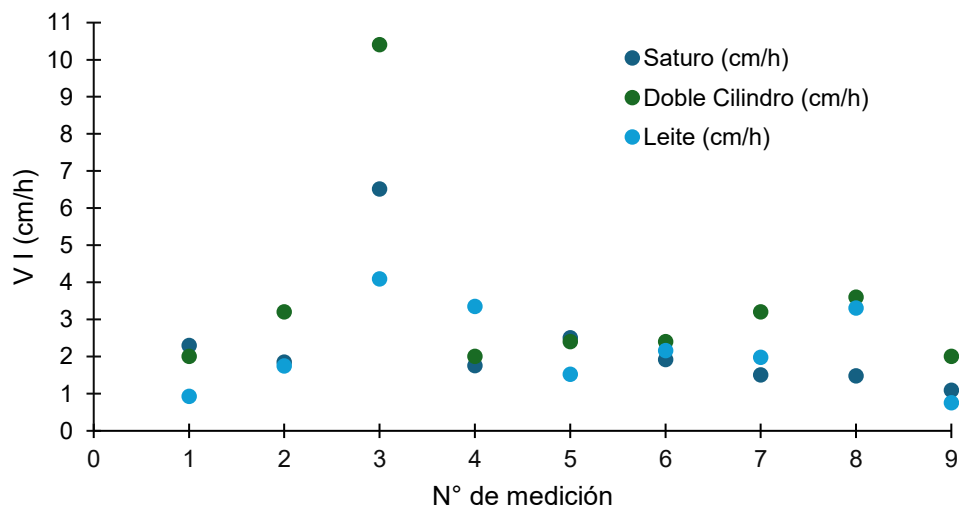


Figura 6. Gráfico de dispersión de datos de velocidad de infiltración para cada prueba de infiltración realizada con cada equipo.

Las pruebas 1 a 3 corresponden a la serie de suelo Mebuca, las pruebas 4 a 6 corresponden a la serie de suelo Arrayán y las pruebas 7 a 9 corresponden a la serie de suelo Quilmén.

Cabe destacar que el dato utilizado de velocidad de infiltración para el cilindro de doble anilla era el último medido luego de la hora y media de prueba, para lograr una mejor aproximación a la velocidad de infiltración básica del suelo.

En cuanto a la comparación entre los equipos de medición de la velocidad de infiltración (VI), se observó de la Figura 6 que en algunas mediciones los equipos Leite y Saturo mostraron resultados similares, mientras que en otras, el cilindro doble anilla y el Saturo presentaron también coincidencia en los datos, por lo que a pesar de que las mediciones fueron cercanas, el equipo Saturo muestra una mejor medición, debido a que generalmente uno de los otros dos equipos se asemejaba a este.

Uno de los aspectos a considerar en esta comparación es la variabilidad del suelo, que, aunque se asumió como homogénea para los fines del experimento, se evidenció la heterogeneidad del terreno en las mediciones. A pesar de que los equipos fueron colocados en lugares cercanos, la presencia de variabilidad en el suelo se reflejó en las diferencias de velocidad de infiltración, incluso en áreas de solo 2 metros de distancia. Esto resalta la importancia de considerar la heterogeneidad del suelo, que puede alterar los resultados independientemente del equipo utilizado. Se detectaron algunas situaciones anómalas (comparados a los demás datos), como por ejemplo la

medición “S3” la cual presenta velocidades de infiltración mayores a las demás, esto debido a que en la serie de suelo Mebuca había un sector que recibía todos los días riego y esta medición en particular fue llevada a cabo en el lugar que no recibía riego diario, lo que pudo provocar un resultado mayor, también algunas mediciones previas descartadas de ese sector rondaban de igual manera por esos valores.

Es válido observar diferencias en la velocidad de infiltración en un mismo punto, siempre que los resultados estén dentro de un rango razonable y compartan el mismo orden de magnitud. El hecho de que las mediciones sean 2 cm/h y 4 cm/h en un mismo punto es un reflejo de la variabilidad natural del suelo. En la práctica, esta variabilidad debe ser considerada al interpretar los datos, tal como lo indican Rawls et al. (1982) en su estudio sobre las propiedades del agua en el suelo.

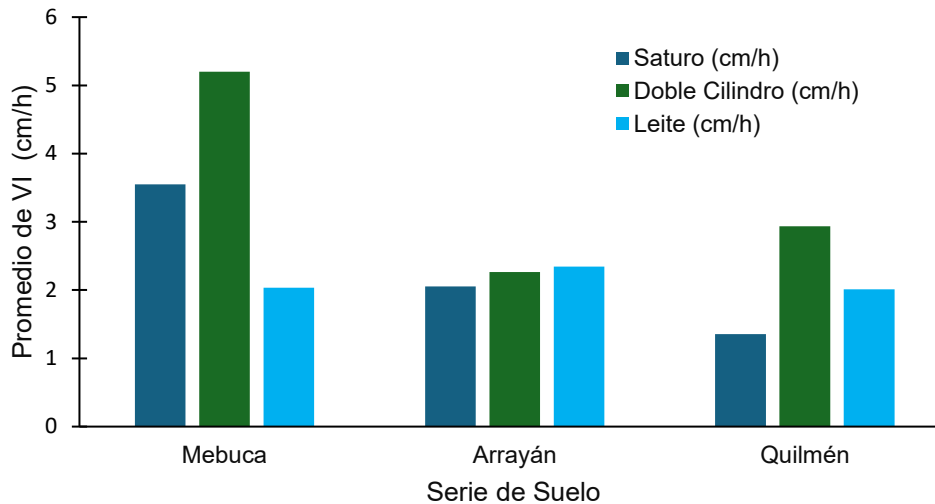


Figura 7. Gráfico de columnas agrupadas para comparar los valores promedios de velocidad de infiltración de cada equipo de acuerdo con las series de suelo.

En la Figura 7 se observa que la serie de suelo más homogénea según los valores promedios de velocidad de infiltración de cada equipo es Arrayán y la más heterogénea de acuerdo a lo explicado con anterioridad es la serie de suelo Mebuca.

Tabla 3. Valores promedios de velocidad de infiltración para cada serie de suelo.

Serie Suelo	Promedios VI (cm/h)
Mebuca	3,59
Arrayán	2,22
Quilmén	2,10

La serie de suelo Mebuca en promedio tiene una mayor velocidad de infiltración, lo cual es razonable, ya que en general es de textura franca lo que indica que tiene un buen equilibrio entre arena, arcilla y limo permitiendo el paso del agua con facilidad. Luego, en segundo lugar, se tiene la serie de suelo Arrayán, la cual es de textura franca limosa por lo que coincide en que se tenga una velocidad de infiltración menor que la de textura franca. Por último, se tiene la serie de suelo Quilmén con una textura generalmente franco arcillo limosa, la cual tiene la menor de velocidad de infiltración promedio, lo que es de esperar, ya que se tiene un mayor contenido de arcilla.

5.3. Discusión sobre las pruebas de infiltración

Durante el proceso de medición, se identificaron varias ventajas y desventajas en los equipos utilizados. El Saturo fue el que más confianza generó, ya que elimina el error humano cuando se instala correctamente, lo que lo convierte en una herramienta muy confiable para mediciones precisas. En comparación con el Leite, que requiere ajustes adicionales y la manipulación de datos mediante el uso del HOB0, el Saturo se mostró más sencillo de usar y menos propenso a errores de calibración.

El infiltrómetro de Leite, aunque es útil y tiene la ventaja de utilizar una menor superficie, al trabajar los datos del sensor de presión HOB0 existió una manipulación en ellos lo que arrastró un posible error humano, debido a que se instalaba el HOB0 y se dejaba midiendo antes de iniciar la prueba, y ahí, mediante el gráfico entregado por el sensor se observaba cuando la presión bajaba al abrir la válvula de paso de agua al inicio de la medición, y al finalizar la prueba se elevaba la presión al abrir el cabezal sellado donde iba el sensor para extraer los datos, por lo cual se definían los horarios en base a la curva y se trabajaban los datos en ese rango. Para este caso una curva ideal de presión debe incrementar a través del tiempo y en ocasiones la curva no seguía el comportamiento esperado lo que obligaba a tomar decisiones de donde extraer los datos de la curva para trabajarlos.

El cilindro doble anilla, aunque es un método ampliamente utilizado, presentó mayores dificultades en su manejo. A diferencia de los otros equipos, el cilindro

depende totalmente del operador, lo que lo hace más susceptible a errores humanos. Además, el proceso de medición con este equipo es físicamente demandante, ya que requiere ayuda para instalarlo y manipular los recipientes de agua debido a su peso, asimismo se debe tener mucho cuidado con el llenado del cilindro para no afectar la posición de la cinta métrica y requiere una constante atención en el cronómetro. Estas dificultades hacen que el cilindro sea menos práctico en comparación con el Saturo, que es más automático y no requiere de tanto esfuerzo manual.

A pesar de que el Saturo fue el equipo que más destacó, se descartaron algunas mediciones debido a fugas de agua cuando la goma de la cámara no se posicionó correctamente, lo que afectó la precisión de los datos. Sin embargo, este fue un problema puntual que no compromete la confiabilidad general del Saturo.

En resumen, la elección del equipo adecuado depende del contexto de la medición y los requisitos de precisión. El Saturo es recomendado por su confiabilidad y facilidad de instalación, mientras que el Leite y el cilindro doble anillo tienen limitaciones que se deben considerar en función de los recursos disponibles y la experiencia del operador.

6. CONCLUSIÓN

En este estudio se evaluaron tres métodos de medición de infiltración, el infiltrómetro de Leite, el infiltrómetro Saturo y el cilindro de doble anilla, en tres tipos de suelos de características variadas (Mebuca, Arrayán y Quilmén), para determinar su precisión, eficiencia y aplicabilidad en condiciones de campo.

Las pruebas de infiltración realizadas revelaron variabilidad en los resultados, reflejando la heterogeneidad natural del suelo, que es un factor fundamental por considerar al interpretar las mediciones. La comparación entre los tres equipos destacó las diferencias en su desempeño bajo condiciones de campo. El infiltrómetro Saturo, al ser un equipo automatizado, demostró ser el más preciso y eficiente, proporcionando resultados rápidos y de alta fiabilidad. No obstante, su alto costo y la necesidad de formación para su correcta operación limitan su accesibilidad para muchos usuarios, especialmente en estudios a gran escala o con recursos limitados. Por otro lado, el infiltrómetro de Leite, aunque menos preciso que el Saturo, es una opción más económica y fácil de instalar, lo que lo convierte en una alternativa viable para estudios en condiciones de campo con menos recursos. Sin embargo, la necesidad de manipulación de datos adicionales mediante el sensor HOBOT introdujo la posibilidad de error humano, lo que afectó la consistencia de algunas mediciones.

El cilindro de doble anilla, que es un método tradicional y ampliamente utilizado, presentó resultados confiables, pero a costa de un mayor tiempo de

medición y un uso intensivo de agua, lo que lo convierte en una opción menos eficiente en comparación con los métodos automatizados como el Saturo. Además, el cilindro de doble anilla depende en gran medida de la precisión del operador, lo que lo hace susceptible a errores humanos, especialmente en condiciones de suelo variables o con acceso limitado a agua.

En cuanto a la variabilidad de los suelos, se observó que en los suelos más homogéneos, como la serie de suelo Arrayán, las diferencias entre los equipos fueron menores. Sin embargo, en los suelos más heterogéneos, como el Mebuca, se evidenció una mayor disparidad en los resultados, lo que refuerza la importancia de considerar la variabilidad del terreno al elegir el equipo adecuado para las mediciones. Los resultados anómalos en ciertas pruebas, como la serie Mebuca, donde se notaron diferencias debido a la presencia de zonas regadas y no regadas, subrayan la influencia del manejo previo del terreno y las condiciones ambientales en la precisión de las mediciones de infiltración.

Este estudio resalta la importancia de la selección adecuada del equipo en función de las condiciones del terreno, la precisión requerida y los recursos disponibles. Las diferencias observadas en las mediciones de infiltración subrayan la relevancia de considerar la heterogeneidad del suelo al realizar este tipo de estudios.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Cushman, J. H. (Ed.). (1999). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press. ISBN 0-8493-4316-X.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- 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, 1-24.
- CIREN. (1999). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio agrológico VIII Región (Publicación CIREN N° 121)*. Centro de Información de Recursos Naturales.
- Orjuela-Matta, H.M.; Y. Rubiano.; J. Camacho-Tamayo. 2010. Modelos de infiltración. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 13 (2): 31-39.
- Leite, P. A. M., Di Prima, S., Schmidt, L. M., & Wilcox, B. P. (2024). A simple infiltrometer automated with a user-friendly pressure datalogger. *Vadose Zone Journal*, 1-8.
- METER Group. (2020). *SATURO Infiltrometer: Manual*. METER Group, Inc.
- Pasternack, G. (2020). *Hydrology 151: Infiltration and Percolation*. University of California, Davis.
- Selker, J. (2020). *Soil Physics and Water Flow in Soils*. Oregon State University.

Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316–1320.
<https://doi.org/10.13031/2013.33720>