

InfiltrR: una Herramienta para Modelar la Infiltración de Agua en el Suelo InfiltrR: a Tool to Model Soil Water Infiltration

Jorge Méndez-González^{1†} , Andrés Flores² , Alejandro Zermeño-González¹ ,
Luis Samaniego-Moreno¹  y Librado Sosa-Díaz³ 

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro No. 1923, Col. Buenavista. 25315 Saltillo, Coahuila, México; (J.M.G.), (A.Z.G.), (L.S.M.).

[†] Autor para correspondencia: jmendezg@hotmail.com

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-COMEF. Progreso No. 5, Col. Barrio de Santa Catarina. 04010 Coyoacán Ciudad de México, México; (A.F.).

³ Consultor Forestal Independiente. Cumbre de Muridores s/n. 43200 Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México; (L.S.D.).

RESUMEN

La infiltración de agua en el suelo es un proceso esencial del ciclo hidrológico que influye en la disponibilidad de agua para las plantas, la recarga de acuíferos y el acceso humano al agua. El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar una aplicación utilizando 'Shiny', que permita simular, calcular y predecir la lámina infiltrada de manera automatizada, interactiva e intuitiva, empleando el método del cilindro. Esta aplicación se desarrolló en el lenguaje de programación R, junto con diversas librerías útiles para tal fin. Los fundamentos teóricos y los cálculos, se basaron en artículos científicos que documentan los procedimientos para el cálculo de la infiltración. Como resultado, se creó infiltrR, una aplicación que no solo simula y calcula la infiltración, sino que también permite la designación de parámetros para optimizar y comprender el proceso de la infiltración de agua en el suelo. La aplicación también permite realizar pronósticos de infiltración en tiempo real, con base en dos modelos matemáticos. Esta aplicación es gratuita, su código completo está disponible en un repositorio de GitHub para posibles adecuaciones y mejoras y se realizará un video en YouTube para el uso de la aplicación. Para usuarios avanzados el código también puede implementarse desde R, o utilizarse desde un simple link sin necesidad de instalar R. Esta herramienta es valiosa para su aplicación en el campo en tiempo real, así como para el proceso educativo, proporcionando una mejor comprensión de los mecanismos relacionados en la infiltración de agua.

Palabras clave: automatización, interactividad, modelos matemáticos, optimización.

SUMMARY

Water infiltration into the soil is a fundamental process in the hydrological cycle, directly influencing plant water availability, aquifer recharge, and human access to water. This study aimed to develop an interactive application using Shiny to automate the simulation, computation, and prediction of infiltration dynamics based on the cylinder method. The application was developed in R, integrating multiple essential libraries to ensure robust functionality. The theoretical framework and computational procedures were based on peer-reviewed scientific literature documenting standardized infiltration estimation methodologies. The resulting application, infiltrR, not only simulates and quantifies infiltration but also allows users to customize parameters, thereby optimizing and improving the understanding of soil infiltration processes. Moreover, the application enables real-time infiltration forecasting based on two mathematical models. This open-source tool is freely accessible, with its complete source code available on GitHub for modification and improvement. Furthermore, a comprehensive instructional video on its use will be published on YouTube. For advanced users, the code can also be implemented directly from R or



Cita recomendada:

Méndez-González, J., Flores, A., Zermeño-González, A., Samaniego-Moreno, L., & Sosa-Díaz, L. (2026). InfiltrR: una Herramienta para Modelar la Infiltración de Agua en el Suelo. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-12. e2269. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2269>

Recibido: 4 de abril de 2025.

Aceptado: 14 de octubre de 2025.

Artículo. Volumen 44.

Marzo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

accessed through a simple link without the need to install R. This application has significant potential for both real-time field applications and educational settings, providing deeper insight into the mechanisms governing soil water infiltration.

Index words: *automation, interactivity, mathematical models, optimization.*

INTRODUCCIÓN

La infiltración es un proceso fundamental en la ciencia del suelo y la agronomía que describe el ingreso del agua al suelo. Medir su capacidad, especialmente con el método del doble anillo, es esencial para comprender la dinámica hídrica del suelo, optimizar el riego, determinar la disponibilidad de agua para cultivos y diseñar sistemas eficientes que maximicen su uso (Romay, Sainato, Iseas y Lemeillet, 2023). El flujo de agua en el suelo genera procesos que pueden ser pasivos y activos y se manifiestan de formas diversas (Teófilo-Salvador, 2025).

La infiltración es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del perfil del suelo, un proceso importante y crucial del ciclo hidrológico que controla la disponibilidad de agua para las plantas, la recarga de acuíferos y la generación de escorrentía superficial (Beven, 2012). Este proceso es dependiente de las propiedades del suelo (textura, estructura, porosidad, materia orgánica), manejo del suelo y vegetación, humedad inicial, pendiente y factores climáticos (Fatichi *et al.*, 2020; Basche y DeLonge, 2019). Los meta-análisis a escala global destacan que factores bióticos y de uso del suelo, como la aforestación o los cultivos de cobertura, elevan significativamente las tasas de infiltración por encima de lo que la textura del suelo predeciría por sí sola. En los trópicos y en regiones con prácticas alternativas, estos aumentos pueden alcanzar hasta el triple (Ilstedt, Malmer, Verbeeten y Murdiyarso, 2007; Basche y DeLonge, 2019). Mientras que la heterogeneidad textural en perfiles multi-capa afecta el drenaje y la retención a través de la histeresis (Huang *et al.*, 2011).

Los hidrólogos utilizan diversos métodos para medir y modelar la infiltración. Entre los más usados se encuentran el infiltrómetro de doble anillo (Farid *et al.*, 2019), este es un método sencillo que consiste en insertar dos estructuras concéntricas en el suelo y medir la tasa de infiltración del agua vertida en el anillo interior.

El método del doble cilindro (double-ring infiltrometer) es una técnica estándar para medir la tasa de infiltración del agua en el suelo, esencial para diseñar riego y gestionar recursos hídricos. Consiste en dos cilindros concéntricos insertados ligeramente en el suelo: el interior mide la infiltración vertical precisa, mientras el exterior actúa como buffer para minimizar el flujo lateral divergente y lograr flujo predominantemente unidimensional (Bouwer, 1986).

Los cilindros se insertan 10 cm en el suelo y se llenan con agua, registrando lecturas a intervalos regulares hasta alcanzar una tasa de infiltración constante. Este método es sencillo, preciso y fiable, aunque puede alterar la estructura del suelo y solo mide en áreas pequeñas. Sus aplicaciones incluyen el diseño de riego, la gestión del agua en agricultura y estudios hidrológicos. Aunque el procedimiento de medición es fácil con este método, para personas que carecen del conocimiento o inexperiencia, esto puede ser complicado.

Debido a la importancia que reviste este proceso y su medición, la infiltración, se emplea en una variedad de campos en especial en la agricultura (Cunha *et al.*, 2015), en la forestería para la conservación de suelo y gestión de cuencas hidrográficas incluso en las áreas urbanas (Weber, 2015).

Tras la medición de la infiltración, se han utilizado algunos modelos matemáticos, por ejemplo, los de Horton, Philip, Kostiakov y Green-Ampt (Beven, 2012; Farid *et al.*, 2019), que describen la tasa de infiltración y la cantidad total de agua infiltrada en función del tiempo. Su implementación computacional y simulación numérica se han vuelto fundamentales en hidrología y gestión del agua, ya que permiten predecir la respuesta hidrológica del suelo bajo variabilidad climática y de uso, optimizando riego, recarga de acuíferos y control de escorrentía en cuencas (Beven, 2012). Diversos trabajos de investigación han abordado la representación digital de estos procesos hidrológicos utilizando variados lenguajes de programación o entornos de desarrollo. Por ejemplo, estudios como el de Bergeson, Martin, Doll y Cutts (2022) han explorado el desarrollo de modelos predictivos de infiltración en cuencas urbanas, comparando enfoques tradicionales con algoritmos de aprendizaje automático, lo que subraya la relevancia de las herramientas computacionales para replicar y optimizar la comprensión de la infiltración del suelo.

El lenguaje de programación R, es un entorno de software libre para computación estadística y gráficos (Kabacoff, 2011; R Core Team, 2024). RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, Integrated Development Environment por sus siglas en el idioma inglés) que facilita la escritura, ejecución y depuración de código R (Posit Software, 2024). Un Shiny, es una herramienta que permite a los usuarios de R crear aplicaciones web interactivas sin necesidad de tener un conocimiento profundo de ambientes de programación HTML, CSS o JavaScript (Chang y Ribeiro, 2023; Chang *et al.*, 2024). Estas aplicaciones pueden utilizarse para visualizar datos, realizar análisis estadísticos, crear simulaciones, de manera que los resultados se actualizan en tiempo real en respuesta a las acciones del usuario (Chang *et al.*, 2024).

El análisis de datos relacionado con la infiltración es complejo, lento y difícil de aplicar, en especial para usuarios con limitada experiencia.

Por ello, resulta fundamental disponer de herramientas que permitan determinar con precisión y de manera automática la tasa de infiltración en suelos. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una aplicación Shiny capaz de calcular, simular y modelar la capacidad de infiltración mediante el método del cilindro doble. Desde el punto de vista pedagógico, esta solución enriquece el proceso de enseñanza al volverla más accesible, más dinámica e interactiva, lo que favorece una comprensión más profunda y un mayor interés por los conceptos hidrológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción General del Proceso

Para este trabajo se siguió el documento desarrollado por López-Beltrán (2021¹), quien ejemplifica claramente el proceso, medición y cálculos de la capacidad de infiltración.

Para la construcción de la aplicación se utilizó el lenguaje de programación R y el entorno de desarrollo RStudio. Se emplearon librerías especializadas, como Shiny para la creación de la interfaz interactiva, plotly para la generación de gráficos dinámicos, DT para la visualización de tablas interactivas y minpack.lm para el ajuste de modelos no lineales (Cuadro 1).

El diseño de la aplicación de tipo Shiny considera los siguientes aspectos: simulación y cálculo de $f(t)$. Para ello, se diseñaron las siguientes secciones:

Visualización de cilindro infiltrómetro. Esta sección se diseñó para visualizar de forma interactiva la simulación del proceso de infiltración personalizando varios componentes de la simulación como: altura y radio del cilindro, altura, color y relleno del líquido, intervalos de tiempo y la cantidad de agua que se drena.

Gráfico de capacidad de infiltración, $f(t)$. En esta sección se incluyó una gráfica de dispersión entre el tiempo transcurrido (min) y la tasa de infiltración (cm hr^{-1}).

Tablas de infiltración. En esta sección se realizan los cálculos de $f(t)$. La tabla contiene parámetros como: la lámina infiltrada (cm), el intervalo de tiempo (min), tiempo acumulado (min) y la velocidad de infiltración, en cm hr^{-1} .

Ajuste de modelos. En adición a la simulación y cálculo de $f(t)$, se agregó el ajuste de dos modelos matemáticos sencillos, que usan el tiempo acumulado, para predecir la capacidad de infiltración acorde a los siguientes modelos:

$$\text{Modelo Kostiakov (1932): } f(t) = a * t^b \quad (1)$$

Donde: $f(t)$ = Velocidad de infiltración (cm hr^{-1}); t = Tiempo acumulado (min); a y b = Representan la capacidad máxima de infiltración (cm hr^{-1}) y la tasa de disminución de la infiltración (adimensional) respectivamente.

$$\text{Modelo Horton (1933): } f(t) = a * \exp(-b * t) + c \quad (2)$$

Donde: $f(t)$ = Velocidad de infiltración (cm hr^{-1}); t = Tiempo acumulado (min); a = Coeficiente que representa la capacidad máxima de infiltración (cm hr^{-1}); b = Tasa a la que disminuye la infiltración con el tiempo (min^{-1}); c = Velocidad mínima de infiltración cuando el suelo está saturado (cm hr^{-1}).

Ayuda. La sección de ayuda de la aplicación incluye instrucciones generales sobre cómo utilizar la herramienta para visualizar un cilindro en 3D y simular la altura del líquido. Se detalla cómo ajustar las dimensiones del cilindro, establecer la altura y el color del líquido, y seleccionar la cantidad de agua infiltrada. Además, se incluye información sobre la tabla de historial que registra los cambios en la altura del líquido y una gráfica de dispersión que muestra las velocidades de infiltración. También se presentan opciones para ajustar modelos de infiltración (Horton y Kostiakov) a los datos observados, junto con sus coeficientes. Por último, se ofrecen consejos prácticos para asegurar un uso efectivo de la aplicación, como verificar la coherencia de las dimensiones y experimentar con diferentes configuraciones.

Enfoque Metodológico y Desarrollo Algorítmico

El diseño computacional de la aplicación se implementó en R, utilizando el framework Shiny para la construcción de la interfaz y la gestión de la reactividad. La arquitectura se soporta en un conjunto de librerías especializadas: shiny y shinydashboard para la estructura principal, plotly para la generación de visualizaciones dinámicas 3D y 2D, DT para la presentación de tablas de datos interactivas, y minpack.lm junto a nlstools para el ajuste robusto de modelos no lineales.

¹ López-Beltrán, M. A. (2021). *Irrigación y drenaje agrícola*. Rpubs. Consultado el 02 de marzo, 2025, desde <https://rpubs.com/Leugimxw9/Irrigacion1>

El núcleo algorítmico se basa en la gestión del estado mediante dos objetos reactivos centrales: alturaLíquido, que almacena el nivel instantáneo del agua, e historialAltura (un data.frame que registra cada evento de infiltración como base de datos de la simulación). El flujo del proceso se inicia con la acción del usuario; al simular una “baja de agua”, un evento (observeEvent) desencadena una secuencia de cálculos que incluye la validación de datos, la conversión de la lámina infiltrada a cm, la actualización del tiempo acumulado y el cálculo de la velocidad de infiltración (cm hr^{-1}), registrando el resultado en el historialAltura. Este registro de datos alimenta de forma reactiva y automática tanto la tabla histórica como la gráfica de dispersión tiempo-velocidad (Figura 1).

El módulo de análisis se activa cuando el usuario solicita el ajuste de modelos. El algoritmo primero valida la existencia de datos en historialAltura. Posteriormente, según la selección del usuario (Horton o Kostiakov), se aplica un ajuste por mínimos cuadrados no lineales (NLS). Para el modelo de Horton, se utiliza la función nlsLM del paquete minpack.lm, que implementa el algoritmo Levenberg-Marquardt para optimizar la convergencia. Para el modelo de Kostiakov, se emplea la función nls de R base. Todo el proceso de ajuste está encapsulado en un bloque tryCatch para manejar posibles errores de convergencia sin interrumpir la aplicación. Si el ajuste es exitoso, se extraen los coeficientes del modelo, el resumen estadístico (incluyendo el pseudo- R^2), y se generan los valores predichos, los cuales se presentan al usuario a través de tablas comparativas, resúmenes textuales y una gráfica superpuesta de valores observados versus estimados. Adicionalmente, la aplicación permite al usuario ingresar un valor de tiempo específico para obtener una estimación puntual, aplicando la ecuación del modelo ajustado con los coeficientes calculados. Finalmente, una función de reinicio permite restaurar la aplicación a su estado inicial, vaciando el historial de datos y restableciendo la altura del líquido para una nueva simulación (Figura 1). Para la construcción de todo el Shiny fue necesaria la utilización de las siguientes librerías (Cuadro 1).

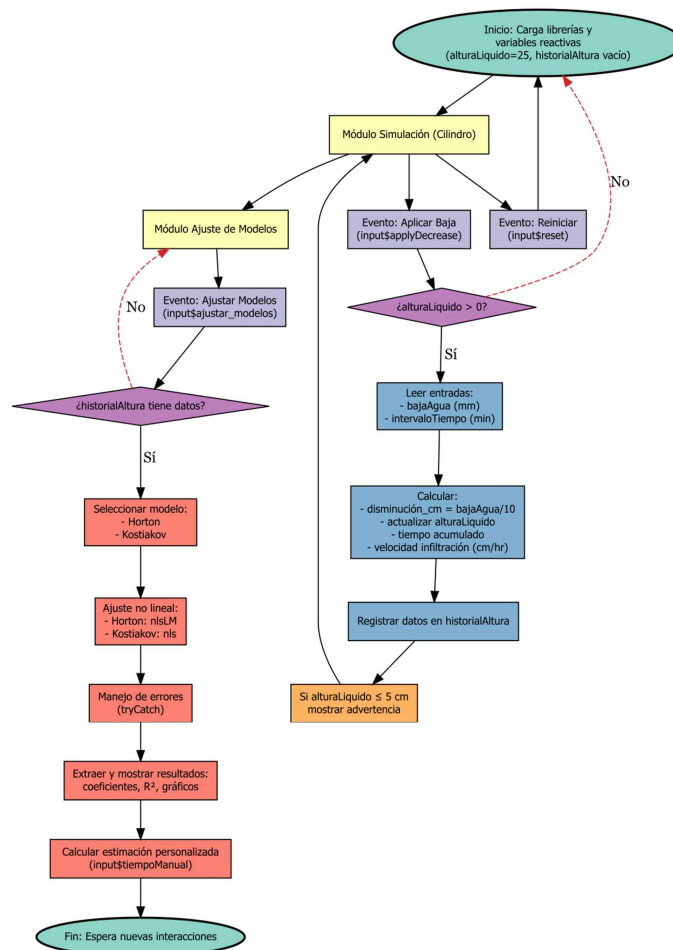


Figura 1. Diagrama de flujo simplificado del proceso algorítmico de infiltR para el cálculo, simulación y ajuste de modelos de infiltración.
Figure 1. Simplified flowchart of the algorithmic workflow implemented in the infiltR package for the computation, simulation, and fitting of infiltration models.

Cuadro 1. Librerías de R utilizadas para el desarrollo de una App interactiva para la simulación, cálculos y predicción de la capacidad de infiltración con el método del cilindro.**Table 1. R packages employed in the development of an interactive application for the simulation, computation, and prediction of soil infiltration capacity using the cylinder infiltrometer method.**

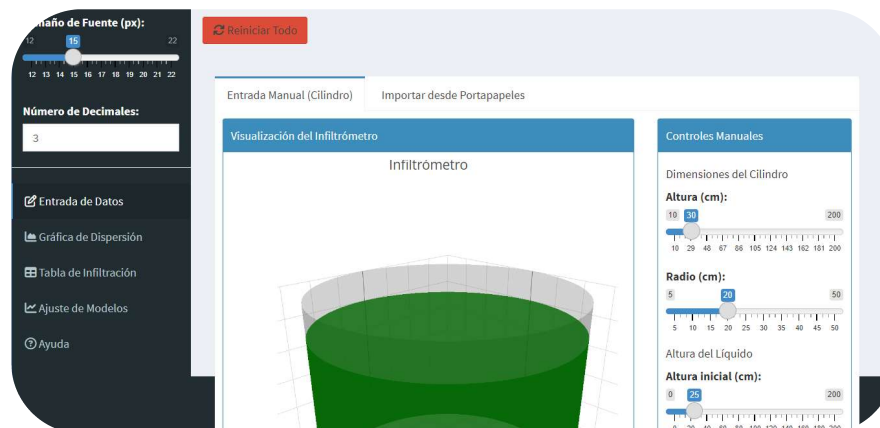
Library	Funciones principales	Cita
shiny	Creación de aplicaciones web interactivas en R.	(Chang <i>et al.</i> , 2024)
shinydashboard	Creación de dashboards con interfaces personalizadas para Shiny.	(Chang y Ribeiro, 2023)
plotly	Visualización de gráficos interactivos en R.	(Sievert, Parmer, Hocking, Chamberlain y Ram, 2020)
minpack.lm	Ajuste de modelos no lineales, método de Levenberg-Marquardt.	(Elzhov, Mullen, Spiess y Bolker, 2022)
DT	Tablas interactivas en R basadas en DataTables de JavaScript.	(Xie <i>et al.</i> , 2023)
nlstools	Herramientas para diagnóstico de modelos no lineales ajustados.	(Baty <i>et al.</i> , 2015)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Interactividad Dinámica. infiltrR permite la visualización y control dinámico de un cilindro tridimensional para simular y analizar la infiltración de líquidos. Los usuarios pueden ajustar las dimensiones del cilindro, como la altura y el radio, mediante controles deslizantes, lo que modifica en tiempo real la representación gráfica del modelo (Figura 2). También es posible regular la altura del líquido dentro del cilindro y seleccionar su color, reflejando estos cambios de forma inmediata, facilitando una experiencia visual personalizada. Adicionalmente, se puede establecer un intervalo de tiempo en minutos para realizar simulaciones y observar cómo evoluciona el nivel del líquido a lo largo del tiempo.

Durante el proceso de simulación. infiltrR permite el rellenado personalizado del cilindro cuando el nivel del agua se encuentra cerca de cero. En tales situaciones, se activa una alarma que indica la necesidad de reabastecer el cilindro con el agua. Si el reabastecimiento no se lleva a cabo, se mostrará un mensaje de advertencia indicando que no hay agua disponible. Esto impedirá el descenso de la lámina, lo que a su vez interrumpirá la continuación de la simulación de infiltración.

Visualización Avanzada. Utilizando la librería Plotly, infiltrR presenta el gráfico de dispersión entre el tiempo acumulado (min) y la capacidad de infiltración (cm hr^{-1}) de forma interactiva que representan la velocidad de infiltración a lo largo del tiempo. Esto permite a los usuarios observar patrones y tendencias de manera intuitiva (Figura 3). Se actualiza automáticamente conforme se ingresan datos al Shiny.

**Figura 2. Modelo interactivo de cilindro para visualizar, ajustar parámetros y simular la infiltración.****Figure 2. Interactive cylindrical model for infiltration visualization, parameter calibration, and simulation.**

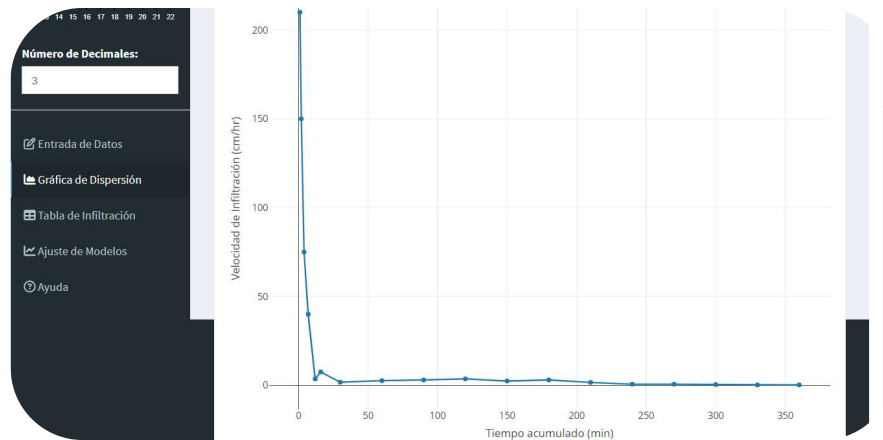


Figura 3. Dinámica de la velocidad de infiltración de agua en función del tiempo.
Figure 3. Dynamics of the water infiltration rate as a function of time.

Simulación de Infiltración. Los usuarios pueden simular la disminución del nivel del agua en el cilindro. Pueden ingresar manualmente la cantidad de descenso y visualizar el volumen infiltrado en cada intervalo (Figura 4). La aplicación (infiltrR) incluye botones para aplicar cambios o reiniciar la simulación, brindando control total del proceso. Además, se muestra una tabla con la lámina infiltrada en cada iteración.

Cálculo de la capacidad de infiltración. La sección “Tabla de Infiltración” en el Shiny, presenta datos sobre: la lámina infiltrada (cm), el intervalo de tiempo (min), el tiempo acumulado (min), y la velocidad de infiltración (cm hr^{-1}). Además, infiltrR ofrece controles de visualización, así como opciones para exportar los datos en formatos como CSV, Excel y PDF para su análisis posterior (Figura 5). A medida que se aplican cambios en el modelo o se simulan nuevas condiciones, la tabla se actualiza automáticamente para reflejar estos ajustes.

Ajuste de Modelos: infiltrR incluye una sección para el ajuste de modelos de infiltración, como los de Horton y Kostiakov. El usuario puede seleccionar el modelo que desea ajustar y hacer clic en “Ajustar Modelo”, se ejecuta un análisis que muestra la fórmula utilizada para calcular la velocidad de infiltración, los parámetros estimados (a , b y c), sus errores estándar y valores t (Figura 6). Además, se ofrece la opción de ingresar manualmente valores de tiempo, lo que permite realizar estimaciones personalizadas. También se presentan predicciones (tabulares y gráficos) basadas en datos observados, lo que convierte a esta herramienta en un recurso valioso para investigadores y estudiantes en el campo de la hidrología. La herramienta tiene aplicaciones en la agricultura, por ejemplo, en la modelación del riego, para contribuir a la tecnificación y mejora de la eficiencia en los sistemas de riego.

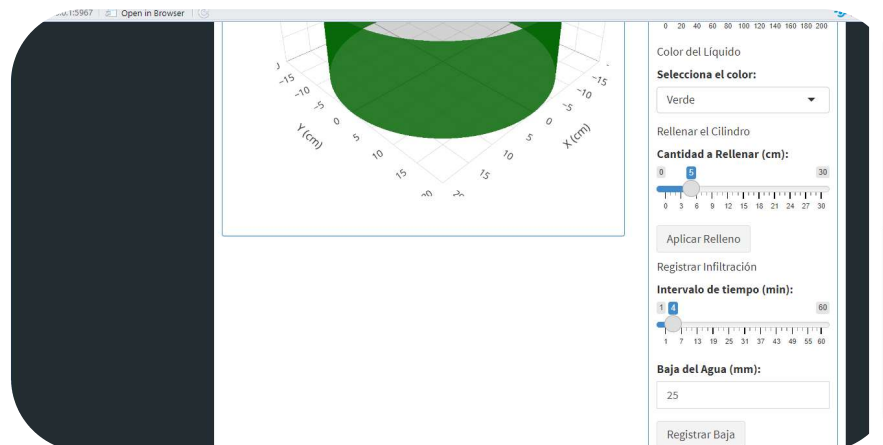


Figura 4. Visualización del proceso de infiltración de agua, con parámetros ajustables para la simulación.
Figure 4. Visualization of the water infiltration process incorporating adjustable simulation parameters.



Figura 5. Resultados del cálculo y simulación de la infiltración de agua en el suelo.
Figure 5. Tabulated results of soil water infiltration calculation and simulation.

infiltR es una herramienta clave para la tecnificación del riego. Permite ajustar datos de campo a modelos teóricos como Kostiakov y Horton. Esto es fundamental porque, al analizar el comportamiento de la tasa de infiltración, infiltR no solo proporciona parámetros hidráulicos precisos, sino que también ayuda a entender cómo factores como la humedad del suelo y la cantidad del agua de riego pueden afectar la infiltración a lo largo del tiempo (Romay *et al.*, 2023).

El diseño de infiltR demuestra la viabilidad de simular y predecir con precisión la infiltración del agua en el suelo, lo que facilita y reduce los tiempos y cálculos necesarios para evaluar la infiltración en cada intervalo temporal. Esta aproximación tiene el potencial de disminuir el uso ineficiente del agua en sistemas agrícolas, que en México consumen aproximadamente el 77% del volumen disponible (López-Medina *et al.*, 2024), especialmente en regiones con escasas precipitaciones. De este modo, infiltR contribuye a promover una mayor eficiencia en la gestión del agua y apoya la sostenibilidad de la producción agrícola (Romay *et al.*, 2023).

infiltR se alinea con el concepto de 'tecnologías de riego inteligente' descrito por Flores y Palacios (2025), quienes destacan la integración de sensores (p. ej.: humedad del suelo a profundidades de 30-60 cm), sistemas de automatización y análisis de datos en tiempo real para optimizar el uso del agua, logrando reducciones del 20-40%. Como paquete de código abierto en R, infiltR tiene potencial para combinarse con estos elementos, modelando tasas de infiltración, para decisiones de riego oportunas y precisas. Aunque este trabajo no incluye pruebas empíricas directas, sienta las bases teóricas para tales integraciones. Además, tecnologías similares han demostrado valor al reducir el consumo de agua hasta en un 30% (López-Medina *et al.*, 2024).

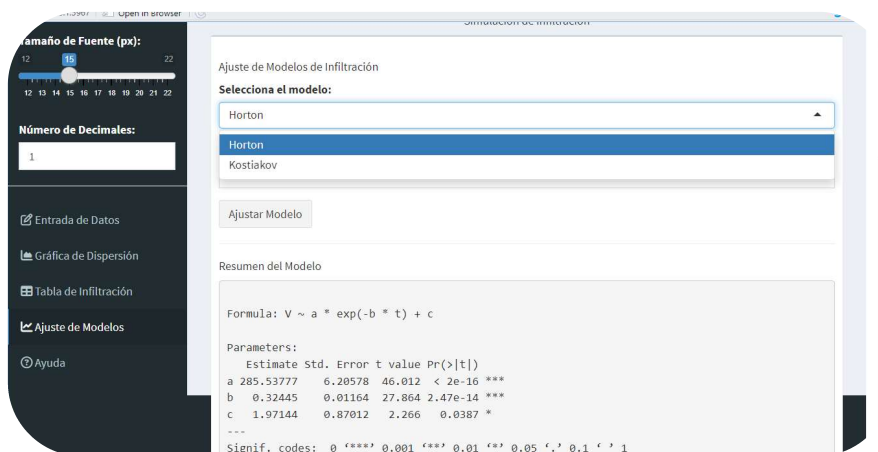


Figura 6. Interfaz en Shiny para el ajuste de modelos y la predicción de la infiltración del suelo.
Figure 6. Shiny-Based interface for model fitting and soil water infiltration prediction.

Además, esta aplicación derriba las barreras de los altos costos de adopción tecnológica. Al ser de código abierto y libre acceso, infiltrR facilita su implementación sin limitaciones, incluso desde cualquier dispositivo móvil. Tampoco hace falta una capacitación especializada para empezar a usarla (aunque existe un video explicativo). La capacidad de infiltrR para procesar y modelar datos de campo de forma interactiva y en tiempo real, representa un avance importante hacia una agricultura más eficiente y tecnificada. Esto no solo mejora la sostenibilidad hídrica y la productividad agrícola, sino que también aporta significativamente a la seguridad alimentaria global (López-Medina *et al.*, 2024).

En infiltrR, se puede ajustar el tamaño de la fuente, mejorando la legibilidad y adaptabilidad a sus preferencias. Esta función se integra manteniendo la coherencia del diseño original, ofreciendo una experiencia de usuario fluida y adaptable.

Modos de Entrada de Datos

infiltrR incorpora dos modalidades de entrada de datos (Figura 7), pensadas para aumentar la versatilidad y eficiencia de su trabajo:

Entrada Manual

Puede ingresar datos manualmente para simular la infiltración y seguir viendo la representación visual del flujo de agua (infiltración) y el descenso en el cilindro.

Importación de Datos

Una innovación clave es la importación directa de datos desde el portapapeles o Excel. Esto permite copiar conjuntos de datos y realizar los cálculos de infiltración de forma automática e inmediata. En este modo, la simulación visual del cilindro no se activa para priorizar la velocidad y el procesamiento masivo de datos sin sacrificar la precisión.

Estas novedades, junto con la capacidad de ajuste de los modelos, aseguran que todos los componentes de la aplicación operen a su máximo rendimiento (100%). La aplicación es una herramienta esencial para el cálculo riguroso y la simulación avanzada de la capacidad de infiltración.

Para verificar la precisión de los cálculos de capacidad de infiltración generados por la aplicación infiltrR, se emplearon los datos originales del Cuadro 2, previamente reportados por López-Beltrán (2021¹). Los valores resultantes de la prueba con infiltrR se ilustran parcialmente en la Figura 5. Al comparar directamente las columnas, se observa que la velocidad de infiltración calculada por la aplicación es idéntica en su totalidad a los resultados reportados por López-Beltrán (2021¹). Esta concordancia total confirma la fiabilidad y exactitud de los algoritmos implementados en infiltrR para la determinación de la capacidad de infiltración.

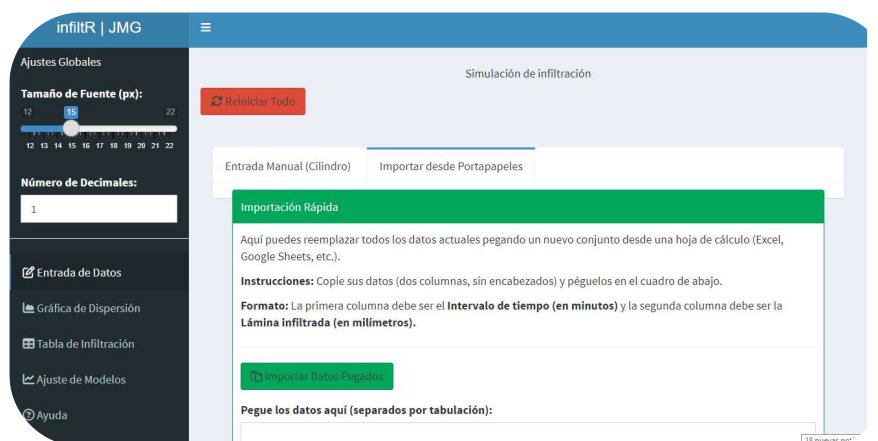


Figura 7. Modalidades de entrada de datos: Entrada manual y carga de datos desde el portapapeles para calcular la capacidad de infiltración.

Figure 7. Data input modes: manual entry and clipboard data import for the computation of infiltration capacity.

Cuadro 2. Registro de observaciones para el cálculo de la velocidad de infiltración (Fuente: López-Beltrán, 2021').
Table 2. Observational data record for infiltration rate determination (Source: López-Beltrán, 2021').

Datos	Hora	Lectura	Lamina infiltrada	Intervalo de tiempo	Tiempo acumulado	Velocidad de Infiltración
			cm	----- min -----		cm hr ⁻¹
1	08:00:00	0	0	0		
2	08:01:00	3.5	3.5	1	1	210
3	08:02:00	6	2.5	1	2	150
4	08:04:00	8.5	2.5	2	4	75
5	08:07:00	2	2	3	7	40
6	08:12:00	2.3	0.3	5	12	3.6
7	08:16:00	2.8	0.5	4	16	7.5
8	08:30:00	3.2	0.4	14	30	1.71
9	09:00:00	4.5	1.3	30	60	2.6
10	09:30:00	6	1.5	30	90	3
11	10:00:00	7.8	1.8	30	120	3.6
12	10:30:00	9	1.2	30	150	2.4
13	11:00:00	1.5	1.5	30	180	3
14	11:30:00	2.3	0.8	30	210	1.6
15	12:00:00	2.6	0.3	30	240	0.6
16	12:30:00	2.9	0.3	30	270	0.6
17	13:00:00	3.1	0.2	30	300	0.4
18	13:30:00	3.2	0.1	30	330	0.2
19	14:00:00	3.3	0.1	30	360	0.2

infiltrR, se desarrolló como una plataforma integral para el análisis de la infiltración de agua en el suelo (Cuadro 3), incluye varios procesos, desde la visualización, análisis y modelado hasta la gestión de datos y resultados.

En lo referente a la eficiencia computacional de la aplicación, los cálculos de la capacidad de infiltración se realizan de manera instantánea al copiar los datos desde el portapapeles y pegarlos en la interfaz. Esto facilita el análisis de datos, optimizando el flujo de trabajo del usuario. Por otra parte, si bien la simulación visual del proceso de infiltración demanda un tiempo de ejecución ligeramente mayor, no constituye una limitación, puesto que se trata de una característica de la aplicación. Además, del propósito principal de la simulación, infiltrR facilita la comprensión del proceso físico de infiltración y sirve como una herramienta didáctica para la enseñanza de los principios hidrológicos. La ligera extensión en el tiempo de procesamiento en este modo se justifica por su valor pedagógico y explicativo, lo que permite a los usuarios visualizar el modo en que las variables de entrada influyen en el comportamiento del agua en el suelo.

Cuadro 3. Principales características de la aplicación infiltR.
Table 3. Core functional characteristics of the infiltR application.

Categoría	Característica de la aplicación	Descripción
Entrada de datos	Dos modos de ingreso	Permite el ingreso de datos de forma manual (simulación visual) o mediante importación desde el portapapeles.
	Simulación visual interactiva	Gráfico 3D del infiltrómetro que se actualiza en tiempo real para reflejar el nivel del agua.
Visualización	Recálculo automático	Calcula automáticamente el tiempo acumulado y la velocidad de infiltración tras cada modificación de los datos.
	Gráfico de dispersión dinámico	Visualización de tiempo vs. velocidad de infiltración que se actualiza en tiempo real con cada cambio.
	Gráfico de ajuste de modelos	Compara visualmente los datos observados (puntos) con la curva del modelo ajustado (línea).
	Ajuste a modelos clásicos	Ajuste numérico de los datos a los modelos no lineales de Horton y Kostiakov.
Análisis y modelado	Resumen estadístico completo	Genera un resumen estadístico del ajuste, incluyendo coeficientes, errores y valores p.
	Estimación predictiva	Predice la velocidad de infiltración para cualquier tiempo dado, utilizando el modelo ya ajustado.
	Tabla de datos interactiva	Presenta los datos en una tabla con funciones de búsqueda, ordenamiento y paginación.
Gestión de datos	Edición y eliminación de datos	Funcionalidad para seleccionar, editar y eliminar filas individuales de la tabla de datos.
	Exportación múltiple	Permite exportar los datos a formatos CSV, Excel, PDF o copiarlos al portapapeles.
	Interfaz de usuario personalizable	Controles para ajustar el tamaño de fuente global y la precisión de los decimales.
Usabilidad y UI	Notificaciones y guía	Sistema de notificaciones para guiar al usuario y una sección de ayuda integrada.
	Diseño responsivo	Diseño adaptable que ajusta la interfaz a diferentes tamaños de pantalla.

CONCLUSIONES

Se desarrolló infiltR, una aplicación Shiny para simular, calcular y predecir la capacidad de infiltración mediante el método del doble cilindro, permitiendo realizar cálculos precisos y dinámicos en tiempo real desde una computadora, incluso desde cualquier dispositivo móvil. La herramienta es intuitiva, fácil de usar, y cuenta con una sección de ayuda, facilitando su uso, incluso para quienes tienen conocimientos básicos o nulos de R. Destaca la integración de gráficos 3D interactivos para mejorar la visualización y comprensión del proceso de simulación y cálculo de la capacidad de infiltración. La aplicación es gratuita y puede ejecutarse directamente desde un entorno Shiny sin necesidad de acceder al programa R, o desde el propio R utilizando el código fuente correspondiente. infiltR es muy útil en el proceso de enseñanza, pero también para su aplicación práctica en las diferentes áreas de las ciencias ambientales y afines. Actualmente, infiltR se centra en el cálculo y la simulación de la capacidad de infiltración empleando los modelos clásicos de Horton y Kostiakov. Su funcionalidad se restringe a datos de infiltrómetros de anillo simple, sin integrar modelos más complejos o de base física como Green-Ampt o Richards, ni considerar la variabilidad espacial o condiciones de contorno complejas del suelo. Ampliaciones futuras incluyen la integración de modelos avanzados (Green-Ampt, Philip, Richards y algoritmos de Machine Learning), la cuantificación de la incertidumbre en los parámetros del modelo y la visualización espacial para generar mapas de infiltración.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

La aplicación infiltrR se ofrece de manera gratuita y está diseñada para facilitar tanto su uso inmediato como su integración en flujos de trabajo más avanzados. Puede ejecutarse directamente en cualquier navegador moderno sin requerir instalación alguna, accediendo al siguiente enlace https://acortar.link/infiltrR_jmg y <https://github.com/JorgeMendezGonzalez>. Alternativamente, los usuarios que deseen trabajar desde el entorno de R pueden descargar el código fuente completo desde el repositorio oficial en GitHub. Cualquier duda o consulta adicional puede dirigirse directamente al autor de correspondencia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.M.G.; Metodología: J.M.G. y L.S.M.; Software: J.M.G. y L.S.D.; Validación: A.Z.G. y L.S.M.; Análisis formal: J.M.G., A.Z.G. y L.S.D.; Investigación: J.M.G. y A.F.; Escritura – preparación del borrador original: J.M.G. y A.F.; Escritura – revisión y edición: A.F. y L.S.D.; Visualización: L.S.D.; Supervisión: J.M.G.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo institucional brindado para la realización de este trabajo. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a las personas que contribuyeron con datos de campo y datos reales, fundamentales para el desarrollo de la aplicación Shiny. También reconocemos la participación de los estudiantes de la materia de Ordenamiento Hidrológico Forestal 2024, de la carrera de Ingeniero Forestal, UAAAN, quienes realizaron prácticas y análisis previos con la aplicación, verificando su correcta funcionalidad y proporcionando valiosas observaciones para su mejora.

LITERATURA CITADA

- Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS One*, 14(9), Article e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J. P., & Delignette-Muller, M. L. (2015). A Toolbox for Nonlinear Regression in R: The Package nlstools. *Journal of Statistical Software*, 66(5), 1-21. <https://doi.org/10.18637/jss.v066.i05>
- Bergeson, C. B., Martin, K. L., Doll, B., & Cutts, B. B. (2022). Soil infiltration rates are underestimated by models in an urban watershed in central North Carolina, USA. *Journal of Environmental Management*, 313, 115004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115004>
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell.
- Bouwer, H. (1986). Intake rate: Cylinder infiltrometer. En A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (pp. 825-843). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Chang, W., & Ribeiro, B. B. (2023). *shinydashboard: Create dashboards with "Shiny"* (Version 0.7.2) [Software]. Vienna, Austria: Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.shinydashboard>
- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Sievert, C., Schloerke, B., Xie, Y., ... & Borges, B. (2024). *shiny: Web Application Framework for R*. (Version 1.7.5). [Software]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.shiny>
- Cunha, J. L., Coelho, M. E., Albuquerque, A. W. D., Silva, C. A., Silva, A. B. D., & Carvalho, I. D. D. (2015). Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(11), 1021-1027. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1021-1027>

- Elzhov, T. V., Mullen, K. M., Spiess, A. N., & Bolker, B. (2022). *minpack.lm: R interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm* (Version 1.2-2) [Software]. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.minpack.lm>
- Farid, H. U., Mahmood-Khan, Z., Ahmad, I., Shakoor, A., Anjum, M. N., Iqbal, M. M., ... & Asghar, M. (2019). Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 84-91. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4015>
- Fatichi, S., Or, D., Walko, R., Vereecken, H., Young, M. H., Ghezzehei, T. A., ... & Avissar, R. (2020). Soil structure is an important omission in Earth System Models. *Nature Communications*, 11(1), 522. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14411-z>
- Flores-Mancheno, C. I., & Palacios-López, L. A. (2025). Tecnologías de riego inteligente y su contribución a la conservación del agua en agricultura. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 3(1), 61-73. <https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n1/46>
- Hidayat, M., & Razali, M. (2018). The influence of vegetation types on the infiltration capacity of le Suum geothermal area in Mount Seulawah Agam. *Journal of Physics: Conference Series*, 1116(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1116/5/052029>
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.
- Huang, M., Barbour, S. L., Elshorbagy, A., Zettl, J. D., & Si, B. C. (2011). Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(2), 169-183.
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., & Murdiyarso, D. (2007). The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014>
- Kabacoff, R. I. (2011). *R in action: Data analysis and graphics with R*. Shelter Island, NY, USA: Manning Publications Co.
- Kostiakov, A. N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. En *Transactions of the Sixth Commission of the International Society of Soil Science, Part A* (pp. 17-21). Moscow, USSR: International Society of Soil Science.
- López-Medina, M. S., Neri-Ramírez, E., Rodríguez-Morán, H. M., Moreno-Ramírez, Y. R., Rocandio-Rodríguez, M., & Segura-Martínez, M. T. J. (2024). La importancia de los sistemas de riego para el uso eficiente del agua en la agricultura. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 3507-3525. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12587
- Posit Software, PBC. (2024). *RStudio: Integrated development environment for R* [Software]. Posit Software, PBC. <https://posit.co/downloads/>
- R Core Team. (2024). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Romay, C., Sainato, C. M., Iseas, M. S., & Lemeillet, F. (2023). Comportamiento del proceso de infiltración del agua en un suelo bajo riego complementario. *Revista Científica de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 41(1), 77-98, 2023
- Sievert, C., Parmer, C., Hocking, T., Chamberlain, S., & Ram, K. (2020). *plotly: Create interactive web graphics via "plotly.js"* (Version 4.10.1) [Software]. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.plotly>
- Teófilo-Salvador, E. (2025). Model of Water Flow Infiltration Force in a Soil Mass. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2186>
- Weber, J. F. (2015). Estimación de los parámetros del modelo de infiltración de Philip en áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Aqua-LAC*, 7(1), 39-48.
- Xie, Y., Cheng, J., Tan, X., Allaire, J. J., Girlich, M., Ellis, G. F., & Rauh, J. (2023). *DT: A wrapper of the JavaScript library "DataTables"* (Version 0.28) [Software]. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.DT>