

**MÉTODOS PARA ENCONTRAR LAS TASAS DE INFILTRACIÓN DE SUELOS
PARCIALMENTE SATURADOS: UNA REVISIÓN
METHODS FOR FINDING INFILTRATION RATES OF UNSATURATED SOILS: A
REVIEW**

Giussepy Agdel Arenas Fonseca¹

Semillero de investigación GeoBi, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Juan de Castellanos,
Tunja, Colombia. gaarenas@jdc.edu.co

Resumen: La comprensión del movimiento del agua a través de los suelos, es de gran importancia para el uso apropiado, el manejo y la protección de nuestros recursos naturales. A través de los años, se han desarrollado diferentes modelos numéricos de estudio que relacionan las tasas de infiltración. Sin embargo, aunque el desarrollo de dichas prácticas suena eficiente debido al uso computacional, lo cierto es que su capacidad es bastante pobre para captar la dinámica del agua, especialmente en suelos de textura fina y perfiles gruesos. Por otra parte, los estudios de suelos son la base investigativa que se tiene en una construcción civil, y es que, a partir de los diferentes ensayos que se realice al subsuelo, el ingeniero civil puede determinar si el suelo en donde se va a realizar cualquier tipo de construcción, tiene la capacidad portante para resistir la estructura. Este trabajo investigativo, tiene una revisión acerca de los modelos y métodos establecidos para determinar las tasas de infiltración; en el cual se conceptualizan los modelos existentes como los son: Green-Ampt, Kostiakov, Kostiakov modificado y Horton; como también los simuladores de lluvia y el infiltrómetro de doble anillo. En conclusión, la tasa de infiltración pasa de ser un parámetro hidrológico a ser una propiedad del suelo, ya que, como se pudo observar en los antecedentes de esta investigación, este valor varía dependiendo el tipo de suelo y sus mismas propiedades.

Abstract: Understanding the movement of water through soils is of great importance for the proper use, management and protection of our natural resources. Over the years, different numerical models have been developed for the study of infiltration rates. However, although the development of such practices sounds efficient due to the computational use, the truth is that their capacity is quite poor to capture water dynamics, especially in fine-textured soils and coarse profiles. On the other hand, soil studies are the investigative basis for a civil construction, and from the different tests performed on the subsoil, the civil engineer can determine if the soil where any type of construction is going to be carried out has the bearing capacity to resist the structure. This research work has a review of the models and methods established to determine infiltration rates; in which the existing models are conceptualized, such as: Green-Ampt, Kostiakov, modified Kostiakov and Horton; as well as rainfall simulators and the double ring infiltration meter. In conclusion, the infiltration rate goes from being a hydrological parameter to being a soil property, since, as was observed in the background of this research, this value varies depending on the type of soil and its properties.

Palabras Clave: Tasa de infiltración, simulador de lluvia, infiltrómetro de doble anillo, Kostiakov, Horton, Green y Ampt, conductividad hidráulica

Keywords: Infiltration rate, rain simulator, infiltrometer of double ring, Kostiakov, Horton, Green y Ampt model, hydraulic conductivity.

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión del movimiento del agua a través de los suelos, es de gran importancia para el uso apropiado, el manejo y la protección de nuestros recursos naturales. Por este motivo, el desarrollo y resolución de modelos teóricos que tengan en cuenta diferentes propiedades de los suelos, tienen gran impacto en disciplinas medioambientales y en la ingeniería [1].

A través de los años, se han desarrollado diferentes modelos numéricos de estudio que relacionan las tasas de infiltración. Sin embargo, aunque el desarrollo de dichas prácticas suena eficiente debido al uso computacional, lo cierto es que su capacidad es bastante pobre para captar la dinámica del agua, especialmente en suelos de textura fina y perfiles gruesos [1][2]. No obstante, progresivamente se han incluido estudios que relacionan perfiles con propiedades heterogéneas y distintas precipitaciones, aumentando la confiabilidad de estos modelos teóricos. Por ejemplo, el modelo de Green-Ampt modificado[1][3], el cual asimila el desplazamiento vertical de un pistón y que supone un equilibrio hidráulico en distintas capas de suelo. Por otro lado, la evaluación de las tasas de infiltración empezaron a hacerse por medio de un simulador de lluvia, en el cual, se pudo identificar que en un intervalo de tiempo, la capacidad de infiltración del suelo sería menor que la intensidad de lluvia que ocurre en un medio [4]. Así mismo, en diferentes épocas se resaltan investigaciones que han mejorado este estudio de infiltración; incluso enmarcaron la diferencia entre la capacidad de infiltración del suelo y la permeabilidad del mismo. Un ejemplo de esto, son los experimentos de Slater y Byers [5] que han sido citados por demás autores como una representación de la capacidad de infiltración que tiene un suelo [4], sin embargo, las condiciones del suelo y la poca profundidad que este estudio maneja, hace que lo que se determine a partir de estos ensayos sea la permeabilidad.

Hay que reconocer en primera medida, que el flujo del agua dentro del suelo, depende de la uniformidad del mismo; por esta razón, intentar entender la infiltración en los diferentes suelos es imposible si antes no se entiende el mismo flujo, simulando condiciones uniformes [6][7]. Por otra parte, la influencia del medio se debe tener en cuenta; en investigaciones previamente hechas, se demuestra la relación que existe entre la cobertura vegetal y las tasas de infiltración de los suelos [8][9][10][11], y es que la cobertura vegetal, como condición natural del suelo, altera ciertas propiedades de infiltración y escorrentía superficial [12][13].

El agua es un recurso natural, que afecta significativamente el suelo y principalmente sus propiedades. Actualmente en Colombia, dentro de las diferentes investigaciones acerca de los suelos, no es recurrente encontrar un estudio que determine las tasas de infiltración evaluando condiciones reales a las que se pueden enfrentar. No obstante, el método de doble anillo es el más usado en Colombia para determinar las tasas de infiltración, debido a su facilidad de manipulación [14]. Phillip [15] ha demostrado el modelo numérico de Kostiakov, por el cual es utilizado la misma herramienta y ensayo de infiltración. Esta práctica, incluye un suelo en condiciones no reales, debido a que este se encuentra en pendientes menores al 1% y no se tiene en cuenta la temperatura ambiente y precipitación.

No obstante, las investigaciones acerca de las tasas de infiltración de suelos comúnmente son hechas en otros países. Este trabajo investigativo tiene como objetivo realizar una revisión de los modelos existentes, los cuales son los que permiten determinar las tasas de infiltración. A partir de los resultados, se presentará una opinión acerca de **cuál método es mejor, teniendo en cuenta datos históricos y otras investigaciones.** De esta manera, la investigación toma como base que el análisis de infiltración es más común en otros países, y aunque los suelos son en teoría los mismos, se presentan a condiciones externas totalmente distintas, las cuales hacen que las propiedades de los suelos sean, por consiguiente, diferente

Históricamente, en Colombia se han presentado múltiples muertes por efectos de deslizamientos de tierras. Estos desastres ocurren principalmente por las altas precipitaciones que se presentan en el país; y es que, según datos recogidos en el periódico El Tiempo [16]: “*Colombia presenta una precipitación promedio de 3240 milímetros anuales de lluvia, siendo el país con mayores precipitaciones seguidas en el mundo*”; lo cual puede incurrir a que se presenten estos tipos de desastres naturales y, por ende, una afectación en la normalidad poblacional.

La capacidad de infiltración depende de factores como las propiedades del suelo, las macroestructuras biológicas dentro del suelo y la cobertura vegetal [4]. De esta manera, estudiar y definir las tasas de infiltración en los suelos, teniendo en cuenta variables como: humedad, temperatura, pendiente, densidad, permeabilidad y porcentaje de cobertura vegetal; podría aumentar la confiabilidad en estos estudios, como también, las construcciones que se vayan a realizar. Visto desde otro ángulo, la capacidad de infiltración del suelo, influye también en el control de escorrentía y erosión [12][13]; Mein y Larson [17] indican que uno de los componentes principales y que afectan la escorrentía de una precipitación, es este mismo parámetro. No obstante, la erosión se caracteriza por ser uno de los principales problemas ambientales en lo que respecta la degradación del suelo y la calidad de los recursos hídricos [18].

2. MODELOS NUMÉRICOS PARA EVALUAR LAS TASAS DE INFILTRACIÓN DE SUELOS

Los modelos numéricos existentes deben ser definidos por pocos parámetros, con el fin de facilitar su cálculo. Estos parámetros son coeficientes de una ecuación algebraica que representa la variación de la infiltración con respecto a un tiempo [15][19]. Dentro de los modelos existentes, **los más acertados en su trabajo** son los siguientes:

2.1. Modelo de Green-Ampt

El modelo de infiltración de Green-Ampt [20], ~~el cual en su trabajo~~ evalúa las tasas de infiltración bajo condiciones especiales de encharcamiento permanente. Muñoz y Gowdish [21], describen que el modelo GA, se basa en las siguientes hipótesis:

- a) Desde el principio, el suelo tendrá una lámina de agua producto del encharcamiento.
- b) El suelo evaluado deberá tener condiciones homogéneas, desde sus propiedades físicas hasta el contenido de humedad, en toda su profundidad.

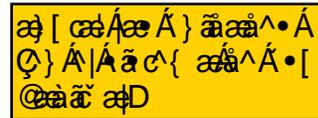
- c) El agua satura el suelo en una misma velocidad en toda su profundidad.

Partiendo de estas hipótesis, Green-Ampt proponen lo siguiente:

$$f = K \left(1 + \frac{h_o + h_s}{L} \right) \quad (1)$$

Donde:

- f: Tasa de infiltración.
- K: Conductividad hidráulica del suelo.
- h_o: Espesor de lámina de encharcamiento.
- h_s: Cabeza de succión capilar en el frente húmedo.
- L: Altura del frente húmedo, debajo del encharcamiento.



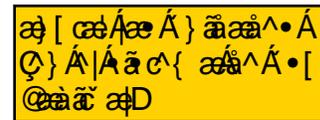
2.2. Modelo de Horton

A diferencia del modelo anterior, Horton [4] representa la velocidad de infiltración de manera exponencial, en la que describe el movimiento del agua con la siguiente ecuación:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-K_f t} \quad (2)$$

Donde:

- f: Velocidad de infiltración.
- f_c: Velocidad de infiltración final.
- f₀: Velocidad de infiltración inicial.
- K_f: Tiempo transcurrido en el que el valor inicial de infiltración es cercano al constante.
- t: Tiempo desde la saturación superficial.



Para entender el modelo exponencial de Horton, Mwendera & Feyen [22] y Roth & Eggert [23] caracterizan el factor exponencial como la lluvia acumulada, el cual es un factor que está relacionado al tiempo, siempre y cuando la intensidad de lluvia se maneje como constante.

2.3. Modelo de Kostiakov y modificaciones

Según Chen et al. [24], Kostiakov en 1932 propuso las siguientes ecuaciones para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada:

$$F(t) = Kt^a \quad (3)$$

$$f(t) = Kat^{a-1} \quad (4)$$

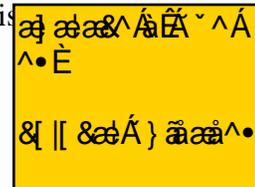
Donde:



- $F(t)$: Infiltración acumulada
- $f(t)$: Tasa de infiltración.
- K y a : Parámetros establecidos según el modelo de Kostiakov.

Según los cálculos que se pueden realizar por medio de la ecuación 4, si el tiempo tiende a infinito, la tasa de infiltración tiende a 0; de esta manera, se demuestra que el modelo de Kostiakov permite determinar las tasas de infiltración solo para tiempos cortos [25]. No obstante, la infiltración en un suelo es un proceso que lleva mucho tiempo y para mitigar la incertidumbre de los resultados obtenidos en los diferentes métodos, los ensayos deben realizarse en tiempos cortos y en un largo plazo.

Teniendo en cuenta lo anterior, Al-Azawi [26], Ahuja et al. [27] y Chen et al. [24]; estudiaron la modificación del método de Kostiakov-Phillip [15] y el del Kostiakov-Lewis [16] y como parámetro adicional la tasa base de infiltración, de la siguiente manera:



$$F(t) = f_b t + Kt^a \quad (5)$$

$$f(t) = f_b + Kat^{a-1} \quad (6)$$

Los modelos nombrados anteriormente son los más usados y conocidos, a partir de estos se hacen muchas modificaciones que también tienen en cuenta diferentes variables y condiciones del suelo.

2.4. Modelos que determinan la conductividad hidráulica

Se puede observar que las ecuaciones 1-6 de cada uno de los modelos tienen en común el uso, como parámetro de entrada, K_r conductividad hidráulica del suelo. En consecuencia, conocer modelos para determinar la conductividad hidráulica del suelo, permitirá aumentar la confiabilidad en los datos obtenidos; Brutsaert [28], realiza una revisión de los diferentes modelos que determinan esta condición del suelo; en el cual se establece lo siguiente:

$$K_r = S_e^\alpha \quad (7)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (8)$$



Donde:

- θ : Contenido de humedad
- θ_r : Contenido de humedad residual
- θ_{sat} : Contenido de humedad en estado de saturación.

Por otra parte, el parámetro α es determinado a partir de la resolución de ecuaciones diferenciales, simulando diferentes condiciones de los suelos. Averjanov [29] propone que este valor sea igual a 3.5, mientras que Irmay [30] deriva el valor a 3.

3. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA TASA DE INFILTRACIÓN DE SUELOS

Dentro de los diferentes métodos para determinar la tasa de infiltración de un suelo, se encuentra el simulador de lluvia. Este instrumento nace en los años 30 y 40, con una evolución en los años 50 [31][32], pero no fue hasta años después que se usó en un área de suelo que escalaba las cuencas hidrográficas para el estudio de la escorrentía [33]–[37] y de infiltración [38]. Sin embargo, hasta este punto los simuladores de lluvia se trataba únicamente de aplicar agua a un área determinada sin tener en cuenta como el agua se pone en contacto con el suelo [31]. De esta manera, teniendo en cuenta que las características de la lluvia, como la intensidad y el tamaño de las gotas, era de gran importancia en la creación de un modelo simulando la lluvia natural; este instrumento empezó a utilizarse teniendo en cuenta los trabajos de Laws [39], Spilhaus [40], Laws y Parsons [41], Gunn y Kinzer [42].

Rauzi [12][13] realiza un estudio de infiltración en un área de 1.21 m^2 (13 ft^2), en los cuales encierra el área de acción en un infiltrómetro de cilindro simple con aproximadamente 0.18 m^2 (2 ft^2), el cual concluye la importancia de tener en cuenta la textura del suelo, ya que, en esta investigación dividida en 4 secciones se observa una diferencia adjudicada a la finura del suelo. De la misma manera, Lyford y Qashu [8], usaron un simulador de lluvia, sin embargo, a diferencia de Rauzi, incluyeron en el estudio unos porcentajes de cobertura vegetal, con el fin de analizar los cambios que pueden ocurrir en los valores de tasas de infiltración. Asimismo, Meyer & Harmon [43] y Tossel et al [44] proponen un estudio de infiltración simulando la lluvia por dos aspersores con un diámetro similar al de las gotas de lluvia, determinado por el método de Eigel y Moore [45]; el cual fue usado también por Sobrinho et al. [14]. Por otro lado, Miller [7] utiliza un sistema de un infiltrómetro autorregistrador en el cual mide el tiempo que tarda una burbuja de aire en atravesar un volumen conocido y previamente calibrado, mientras el agua fluye por un suelo.

Por su parte, Whisler y Bruce [46], Suleiman y Swartzendruber [47], han trabajado con el infiltrómetro descrito por Bertrand y Parr [48] y mejorado por Dixon y Peterson [49]; en el cual se usa un aspersor que aplica agua sobre los 12.5 cm/h en un área determinada, por medio de dos tubos de acceso. Posteriormente, Cerda [50], determina las tasas de infiltración de un área de la Provincia de Valencia, en el cual usa un simulador de lluvia y un infiltrómetro como el descrito por Bertrand y Parr [48]. Además de los estudios por medio del simulador de lluvia, otros autores tienen en cuenta evaluar diferentes variables, las cuales condicionan los suelos y, por tanto, las tasas de infiltración. En el caso de Mwendera y Saleem [10] que evaluaron este parámetro con niveles de pastoreo e incluyendo como variable dos sitios de aplicación con pendientes de 0-4% y 4-8%.

Recientemente, en el año 2006 Aoki y Sereno [51], evalúan las tasas de infiltración mediante un simulador de lluvia, comparando los valores obtenidos con los modelos de Phillip y Horton; observando que en cada una de las combinaciones, se presenta un patrón de comportamiento similar en el inicio del experimento; el cual es que en condiciones de baja saturación o seco, la tasa de infiltración tiene un rango constante de velocidades altas y concluyendo que este parámetro es de gran ayuda para determinar ciertas propiedades del suelo. Por otra parte, Cecilio et al. [52], evalúa los resultados obtenidos en un simulador de lluvia, con ayuda del modelo de Green-Ampt; sin embargo, realizan una sustitución de los parámetros de entrada de acuerdo a las propiedades del suelo, demostrando que estos modelos aún no son perfectos y concluyendo que hubo una mejora en la obtención del parámetro de infiltración.

A partir de la determinación y el mejoramiento de los modelos existentes, las investigaciones recientes se dedicaron a comparar los diferentes modelos, con el fin de determinar cuál de ellos es el más indicado para determinar las tasas de infiltración. Rodríguez et al. [53], como por ejemplo, estudio la variabilidad de los datos obtenidos y determinados por los modelos de Kostiakov y el mejorado por Phillip, usando suelos con niveles de cobertura vegetal y una pendiente del 1%; concluyendo que las condiciones del suelo hacen que haya una variabilidad espacial en los dos modelos, sin embargo, el modelo de Kostiakov, permite incluir las propiedades de los suelos de mejor manera que el mejorado por Phillip.

Posteriormente, aparece el método más utilizado actualmente debido a la simplicidad de la medición denominado el infiltrómetro de doble anillo o método de Müntz [54]. Weber [54] realiza una comparación entre este método y el de simulador de lluvia usando como determinante la capacidad de infiltración el modelo de Horton; concluyendo que para valores de precipitación altos el método de simulador de lluvia arroja valores más grandes, mientras que los resultados se invierten cuando los valores de precipitación son más bajos.

DISCUSIÓN

Por medio del uso de diferentes bases de datos como lo son Science direct, Google académico, Scopus y Semantic Scholar, se evidenció que la creación de los modelos y métodos establecidos para determinar las tasas de infiltración, es mayormente hecho en el siglo XX. A partir del siglo XXI, los trabajos realizados son, en gran medida, comparaciones de los modelos y métodos establecidos en años anteriores. No obstante, se evidencia que la innovación y el desarrollo de esta investigación, se basa en incluir más variables en el estudio de infiltración de diferentes suelos. En este artículo, se resaltan 62 investigaciones de las cuales se consideran las más influyentes; esto es debido a que, en primer lugar, se tienen en cuenta aquellas que dieron base para la investigación reciente y, por otra parte, aquellas que han incluido en su investigación nuevas variables o comparaciones de los modelos. Sin embargo, los resultados arrojados en la base de datos Semantic Scholar, es alrededor de 10.000 investigaciones entre los años 1935-2023, justo como se muestra a continuación:

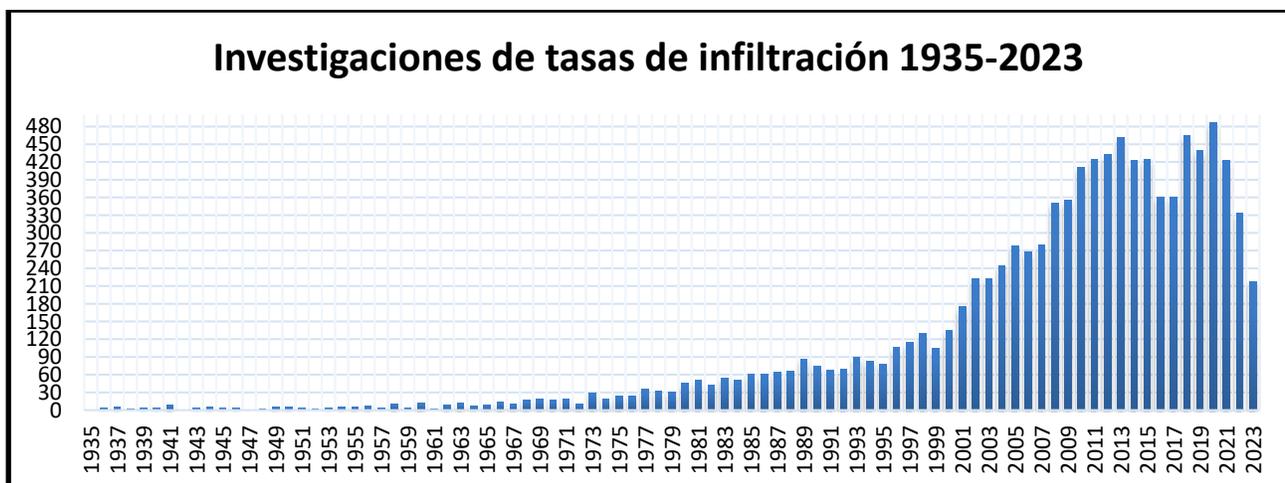


Figura 1. Resultados encontrados en semantic scholar para "infiltration rates in soils"

Como se puede observar en la Figura 1, la mayor cantidad de investigaciones están hechas en el presente siglo, sin embargo, es de resaltar que los modelos usados recientemente, son aquellos que se crearon en este siglo. Por otro lado, en el año 2020, se ha realizado la mayor cantidad de investigaciones, de las cuales se pueden resaltar los trabajos realizados por Zhu et al. [9] y Lozano et al. [55].

Por otra parte, según los antecedentes de esta investigación bibliográfica, se debe resaltar que la mayoría de autores realizan la siguiente metodología para determinar este parámetro del suelo:

1. Selección del suelo.
2. Selección del método para determinar la infiltración (Simulador de lluvia, infiltrómetro de doble anillo, etc.)
3. Selección del modelo de infiltración (Green-Ampt, Horton, Kostiaikov y sus modificaciones)

En este último paso, se recomienda realizar un primer análisis comparativo en los modelos establecidos, de tal manera, se puede identificar el mejor modelo para usar, dependiendo de las condiciones y propiedades que tiene el suelo seleccionado para el estudio. Autores como Machiwal et al [56], Haghghi et al [57] y Mudiare et al. [58] usaron el coeficiente de determinación (R^2) como criterio de comparación de los modelos de infiltración. Por otra parte, para comparar estos modelos también son usados los coeficientes de eficiencia (ME), el modelo del error cuadrático medio (RMSE) y la diferencia porcentual media (MPD) [59]–[62].

CONCLUSIONES

La infiltración es un parámetro hidrológico que permite establecer ciertas líneas de nivel de perfiles húmedos o nivel freático. El estudio de este parámetro data sobre casi los cien años a partir de la realización de esta investigación, en los cuales, se observa ciertas evoluciones en sus modelos y métodos para determinar este valor.

La tasa de infiltración pasa de ser un parámetro hidrológico a ser una propiedad del suelo, ya que, como se pudo observar en los antecedentes de esta investigación, este valor varía dependiendo el tipo de suelo y sus ~~mismas~~ propiedades. Es por esto que, la tasa de infiltración debe evaluarse teniendo en cuenta factores como precipitación, humedad o niveles de saturación, ~~incluyendo~~ pendientes, temperatura, escurrimiento, niveles de densificación o compactación. Determinar este valor a partir de las condiciones mencionadas anteriormente, permitirá aumentar la confiabilidad en los estudios de suelos y la determinación del nivel freático que posee un suelo.

A partir de las diferentes comparaciones que se realizan a los diferentes modelos y métodos, se puede concluir que el uso de cada uno, es variable respecto al tipo y condición de los suelos, como también la cantidad de datos que se obtienen. Por otra parte, la evaluación de tasas de infiltración debe hacerse en plazos cortos, como intervalos de tiempo en minutos, hasta tiempos largos que se pueden establecer en días de trabajo. Sin embargo, las diferentes modificaciones que se realizaron para cada uno de los modelos, establecen que estos se pueden mejorar incluyendo más variables de estudio, como también la implementación de otro tipo de método para determinar la tasa de infiltración inicial.

4. REFERENCIAS

- [1] M. A. Herrada, A. Gutiérrez-Martin, and J. M. Montanero, "Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition," *J. Hydrol.*, vol. 515, pp. 10–15, 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.026.
- [2] C. Gandolfi, A. Facchi, and D. Maggi, "Comparison of 1D models of water flow in unsaturated soils," *Environ. Model. Softw.*, vol. 21, no. 12, pp. 1759–1764, 2006, doi: 10.1016/j.envsoft.2006.04.004.
- [3] X. Chu and M. A. Mariño, "Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall," *J. Hydrol.*, vol. 313, no. 3–4, pp. 195–207, 2005, doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.002.
- [4] R. E. Horton, "An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 5, no. C, pp. 399–417, 1941.
- [5] C. Slather and H. Byers, "A laboratory study of the fields percolation rates of soils," *U.S.D.A Tech*, 1931.
- [6] R. M. Gonzaga, J. V. Prado Hernández, M. A. Vázquez Peña, L. A. Ibáñez Castillo, and F. P. Ramírez, "Evaluation of surface runoff from the numerical curve and green-ampt models in the chapingo River Basin, Mexico," *Terra Latinoam.*, vol. 37, no. 3, pp. 291–301, 2019, doi: 10.28940/terra.v37i3.484.
- [7] D. E. Miller and W. H. Gardner, "Water Infiltration into Stratified Soil," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 26, no. 2, pp. 115–119, 1962, doi: 10.2136/sssaj1962.03615995002600020007x.
- [8] F. P. Lyford and H. K. Qashu, "Infiltration Rates as Affected by Desert Vegetation," *Water Resour. Res.*, vol. 5, no. 6, pp. 1373–1376, 1969, doi: 10.1029/WR005i006p01373.
- [9] P. Zhu, G. Zhang, H. Wang, and S. Xing, "Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China," *J. Hydrol.*, vol. 590, no. August, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125535.
- [10] E. J. Mwendera and M. A. M. Saleem, "Infiltration rates, surface runoff, and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands," *Soil Use Manag.*, vol. 13, no. 1, pp. 29–35, 1997, doi: 10.1111/j.1475-2743.1997.tb00553.x.
- [11] A. D. Basche and M. S. DeLonge, "Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis," *PLoS One*, vol. 14, no. 9, pp. 1–22, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0215702.
- [12] F. Rauzi and A. R. Kuhlman, "Water Intake as Affected by Soil and Vegetation on Certain Western South Dakota Rangelands," *J. Range Manag.*, vol. 14, no. 5, p. 267, 1961, doi: 10.2307/3894745.
- [13] F. Rauzi and C. Fly, "Water intake on midcontinental rangelands as influenced by soil and plant cover," *Agric. Res. Serv. Soil Conserv. Serv. U.S.D.A*, 1968.
- [14] P. Alves Sobrinho, Teodorico Ferreira and F. Pruski, "Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 6, no. 2, pp. 337–344, 2002.
- [15] J. . Phillip, "The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations," *Commonw. Sci. Ind. Res. Organ.*, 1956, [Online]. Available: https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1957/09000/The_Theory_of_Infiltration__4__Sorptivity_and.10.aspx
- [16] S. Venera, "Este es el lugar más lluvioso del mundo," *El Tiempo*, 2023.

[https://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/mawsynram-india-es-el-lugar-mas-lluvioso-del-mundo-732506#:~:text=Colombia%2C el país más lluvioso del mundo&text=Según el Instituto de Hidrología,mes es de 1.000 mm.](https://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/mawsynram-india-es-el-lugar-mas-lluvioso-del-mundo-732506#:~:text=Colombia%2C%20el%20pa%C3%ADs%20m%C3%A1s%20lluvioso%20del%20mundo&text=Seg%C3%BAn%20el%20Instituto%20de%20Hidrolog%C3%ADa,mes%20es%20de%201.000%20mm.)

- [17] Mein, R.G and C. . Larson, “Modeling infiltration during a steady rain,” *Water Resour. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 384–394, 1973.
- [18] V. Grah Ponciano, I. de M. Ponciano, L. Siqueira Gama, and M. Souca Silva, “Desenvolvimento de um simulador de chuva pendular portátil,” *Rev. Cienc. Agrícola*, vol. 19, no. 1, 2021.
- [19] G. Free, G. Browning, and G. Musgrave, “Relative infiltration and related characteristics of certain soils,” *Tech. Bull. U.S.D.A.*, vol. 729, 1940.
- [20] W. Green and G. Ampt, “Studies of Soil Physics, Part - 1: The flow of air and water through soils,” *J. Agric. Sci.*, vol. 4, pp. 1–24, 1911.
- [21] R. Muñoz and L. Gowdich, “Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos,” *Estud. la Zo. no saturada del suelo*, vol. 7, pp. 205–213, 2005.
- [22] E. J. Mwendera and J. Feyen, “Predicting tillage effects on infiltration,” *Soil Science*, vol. 155, no. 3. pp. 229–235, 1993. doi: 10.1097/00010694-199303000-00009.
- [23] C. H. Roth and T. Eggert, “Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soils,” *Soil Tillage Res.*, vol. 32, no. 2–3, pp. 253–268, 1994, doi: 10.1016/0167-1987(94)90024-8.
- [24] J. Chen, V. Ravi, and J. Williams, “Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone : Application of Selected Mathematical Models Volume II,” *Environ. Prot.*, vol. II, no. February, p. 44, 1998.
- [25] J. F. Weber and L. Apestegui, “Parámetros de los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba,” no. October, pp. 1–10, 2014.
- [26] A.-A. Saadi, “Experimental evaluation of infiltration models,” *J. Hydrol.*, vol. 24, no. 2, pp. 77–88, 1985.
- [27] L. R. Ahuja, J. A. Kozak, A. A. Andales, and L. Ma, “Scaling parameters of the Lewis-Kostiakov water infiltration equation across soil textural classes and extension to rain infiltration,” *Trans. ASABE*, vol. 50, no. 5, pp. 1525–1541, 2007.
- [28] Wilfried Brutsaert, “Some Methods of Calculating Unsaturated Permeability,” *Trans. ASAE*, vol. 10, no. 3, pp. 0400–0404, 1967, doi: 10.13031/2013.39683.
- [29] S. Averjanov, “About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation,” *Eng. Collect.*, vol. 7, 1950.
- [30] S. Irmay, “On the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” *Trans. Am. Geophysic Union*, vol. 35, no. 3, pp. 1–5, 1954.
- [31] A. Cerdà, “Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología: Estado de la cuestión,” *Cuad. Investig. Geográfica*, vol. 25, pp. 45–84, 1999.
- [32] K. G. Renard, “Rainfall simulation as a research tool. US Department of Agriculture, Science and Education Administration. Agricultural Reviews and Manuals ARM-W-10.,” *Proc. Rainfall Simulator Work. Tucson, Arizona March 7-9, 1979*, no. July, pp. 60–64, 1979.
- [33] J. Christiansen, “The uniformity of application of water by sprinkler system,” *Agric. Eng.*, vol. 22, pp. 89–92, 1941.

- [34] C. Izzard, "The surface profile of overland flow," *Trans. Am. Geol. Union, Pap. Hydrol.*, pp. 693–711, 1944.
- [35] H. Holtan and M. Kirkpatrick, "Rainfall infiltration and hydraulics of flow in runoff computations," *Trans. Am. Geol. Union, Pap. Hydrol.*, vol. 31, no. 5, pp. 771–779, 1950.
- [36] V. Chow and B. Yen, "A laboratory watershed experimentation system," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 27, p. 196, 1974.
- [37] A. Turner, "The simulation of rainfalls for studies in overland flow," *J. Inst. Eng.*, pp. 9–15, 1965.
- [38] H. Holtan, "A concept of infiltration estimates in watershed engineering," *USDA Agric. Res. Serv.*, p. 25, 1961.
- [39] J. Laws, "Measurement of the fall-velocity of water drops and rain drops," *Trans. Am. Geol. Union*, vol. 22, pp. 709–721, 1941.
- [40] A. Spilhaus, "Drop size, intensity, and radar echo of rain," *J. Meteorology*, vol. 5, pp. 161–164, 1948.
- [41] J. Laws and D. Parsons, "The relationship of raindrop size to intensity," *Trans. Am. Geophysical Union*, vol. 24, pp. 452–460, 1943.
- [42] R. Gunn and G. Kinzer, "Terminal velocity of water droplets in stagnant air," *J. Meteorology*, vol. 6, pp. 243–248, 1949.
- [43] L. D. Meyer and W. C. Harmon, "Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes.," *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 100–103, 1979, doi: 10.13031/2013.34973.
- [44] R. Tossell, W. Dickinson, R. Rudra, and G. Wall, "A portable rainfall simulator," *Can. Agric. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 155–162, 1987.
- [45] J. D. Eigel and I. D. Moore, "A simplified technique for measuring raindrop size and distribution.," *Trans. - Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 1079–1084, 1983, doi: 10.13031/2013.34080.
- [46] R. R. Bruce and F. D. Whisler, "Infiltration of Water into Layered Field Soils," *Phys. Asp. soil water salts Ecosyst.*, no. 1, pp. 77–89, 1973, doi: 10.1007/978-3-642-65523-4_9.
- [47] K. A. Suleiman and D. Swartzendruber, "Measurement of sated hydraulic conductivity of surface soil in the field with a small-plot sprinkling infiltrometer," *J. Hydrol.*, vol. 272, no. 1–4, pp. 203–212, 2003, doi: 10.1016/S0022-1694(02)00265-2.
- [48] A. Bertrand and J. Parr, "Desing and operation of the purdue sprinkling infiltrometer," *Indiana Agric. Exp. Sta. Res. Bull.*, vol. 723, 1961.
- [49] R. Dixon and A. Peterson, "A vacuum system for accumulating runoff from infiltrometers," *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 32, pp. 123–125, 1968.
- [50] A. Cerdà, "Seasonal changes of the infiltration rates in a mediterranean scrubland on limestone," *J. Hydrol.*, vol. 198, no. 1–4, pp. 209–225, 1997, doi: 10.1016/S0022-1694(96)03295-7.
- [51] A. M. Aoki and R. Sereno, "Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias," *AgriScientia*, vol. 23, no. 1, pp. 23–31, 2006.
- [52] R. A. Cecílio, M. A. Martinez, F. F. Pruski, D. D. da Silva, and W. F. Ataíde, "Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil," *Rev. Bras. Ciência do Solo*, vol. 31, no. 5, pp. 1141–1151, 2007, doi: 10.1590/s0100-06832007000500029.
- [53] A. Rodríguez, A. Aristizábal, and J. Camacho, "Variabilidad espacial de los modelos de

- infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo ándico,” *Jaboticabal*, vol. 28, no. 1, pp. 64–75, 2008.
- [54] J. Weber, “Una Comparación Entre Los Métodos Del Doble Anillo Y Del Simulador De Lluvia En La Medición De La Capacidad De Infiltración,” *ResearchGate*, no. July, 2015.
- [55] S. Lozano-Trejo, J. Olazo-Aquino, M. I. Pérez-León, E. Castañeda-Hidalgo, G. O. Díaz-Zorrilla, and G. M. Santiago-Martínez, “Infiltration and runoff of water in soils of a basin, in southern Mexico,” *Terra Latinoam.*, vol. 38, no. 1, pp. 57–66, 2020, doi: 10.28940/terra.v38i1.443/711.
- [56] Machiwal D, M. Jha, and B. Mal, “Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India,” *Biosyst. Eng.*, vol. 95, no. 4, pp. 569–582, 2006.
- [57] Haghighi F, M. Gorji, Shorafa M, F. Sarmadian, and M. Mohammadi, “Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters,” *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 210–217, 2018.
- [58] O. Mudiare and J. Adewumi, “Estimation of infiltration from field-measured sorptivity values,” *Niger. J. Soil Enviroment Res.*, vol. 1, pp. 1–3, 2000.
- [59] H. Igbadun and U. Idris, “Perfomance evaluation of infiltration models in a hydromorphic soil,” *Niger. J. Soil Enviroment Res.*, vol. 7, pp. 53–59, 2007.
- [60] J. Nash and J. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models,” *J. Hydrol.*, vol. 10, pp. 282–290, 1970.
- [61] H. Farid, Bakhsh A, Z. Mahmood-Khan, and A. Ahmad, “Using CERES-wheat model for simulating fertilizer application rates to maximize grain yield,” *J. Agric. Sci.*, vol. 7, no. 7, pp. 115–127, 2015.
- [62] A. Bakhsh, I. Bashir, H. Farid, and S. Wajid, “Using CERES-wheat model to simulate grain yield production function for Faisalabad, Pakistan, conditions,” *Expl Agric.*, vol. 49, no. 3, pp. 461–475, 2013.