



Comparación de los métodos doble anillo y pozo invertido en la determinación de conductividad hidráulica

Comparison of the double ring and inverted well methods in the determination of hydraulic conductivity

Autores

✉ *Freddy Carlos Gaviláñez Luna

✉ Luis Saúl San Martín Larrea

Universidad Agraria del Ecuador,
Milagro, Ecuador.

*Autor de correspondencia.

Citacion sugerida: Gaviláñez Luna, F. C. y San Martín Larrea, L. S. (2023). Comparación de los métodos doble anillo y pozo invertido en la determinación de conductividad hidráulica. *La Técnica*, 13(1), 30-36. DOI: <https://doi.org/10.33936/latecnica.v13i1.5633>

Recibido: Mayo 17, 2023

Aceptado: Junio 06, 2023

Publicado: Junio 16, 2023

Resumen

Con el objetivo de verificar la bondad del método de doble anillo, como alternativa de determinación de la conductividad hidráulica en un suelo saturado, se comparó este procedimiento con el método del pozo invertido. La experiencia se desarrolló en el campus de la Universidad Agraria del Ecuador, en una superficie de 35 m² de un vertisol, franco arcilloso, en la cual se delimitaron 15 unidades experimentales de 1,8 m² para evaluar conjuntamente las dos metodologías antes indicadas. El anillo interior tuvo 33 cm de diámetro y el exterior 56 cm, ambos con una altura de 35 cm; tomando lecturas durante 120 minutos y con cargas hidráulicas entre 15 a 10 cm. Los pozos invertidos tuvieron un diámetro de 6 cm y una profundidad de 60 cm, manteniendo cargas hidráulicas medias iniciales y finales de 50,6 y 35,6 cm, respectivamente. En el doble anillo se utilizó la ecuación de Kostiakov, verificando su ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2); y en el pozo invertido se aplicó la ley de Darcy, considerando infiltración tanto en el fondo como en la pared del pozo. La comparación se realizó con la prueba t de Student, previa constatación de la correlación entre las lecturas. Los datos del doble anillo se ajustaron al modelo de Kostiakov ($R^2 > 90\%$) y se correlacionaron significativamente ($P = 0,048$) con los datos del pozo invertido de manera positiva; el primero obtuvo una media de 0,3421 y el segundo 0,3242 m·día⁻¹, cuya diferencia fue no significativa ($P = 0,6477$). El método de doble anillo ofrece resultados similares de conductividad hidráulica respecto del procedimiento del pozo invertido.

Palabras clave: agua subterránea; capa acuífera; drenaje, flujo de agua; humedad del suelo.

Abstract

In order to verify the goodness of the double ring method, as an alternative for determining the hydraulic conductivity in unsaturated soil, this procedure was compared with the inverted well method. The experience was developed on the campus of the Agrarian University of Ecuador, on a 35 m² surface of vertisol, clay loam, in which 15 experimental units of 1.8 m² were delimited to jointly evaluate the two aforementioned methodologies. The inner ring was 33 cm in diameter and the outer 56 cm, both with a height of 35 cm; taking readings for 120 minutes and with hydraulic loads between 15 to 10 cm. The inverted wells had a diameter of 6 cm and a depth of 60 cm, maintaining mean initial and final hydraulic loads of 50.6 and 35.6 cm, respectively. In the double ring, the Kostiakov equation was used, verifying its adjustment by means of the coefficient of determination (R^2); and in the inverted well, Darcy's law was applied, considering infiltration both at the bottom and at the wall of the well. The comparison was made with the Student's t test, after confirming the correlation between the readings. The double ring data were fitted to the Kostiakov model ($R^2 > 90\%$) and were significantly correlated ($P = 0.048$) with the inverted well data in a positive way; the first obtained a mean of 0.3421 and the second 0.3242 m·day⁻¹, whose difference was not significant ($P = 0.6477$). The double ring method offers similar hydraulic conductivity results with respect to the inverted well procedure.

Keywords: aquifer layer; drainage; humidity of floor; underground water; water flow.

Introducción

La conductividad hidráulica es uno de los parámetros hidrofísicos de los suelos importante, pues representa la medida hidrodinámica de los flujos subterráneos de agua y por ello, es un factor elemental tanto en el diseño como en la funcionalidad de las obras de drenaje agrícola, así como en el estudio y explotación de acuíferos. Su dependencia de características edáficas como la textura, estructura, densidad aparente, porosidad, cavidades, rajaduras y contenido de materia orgánica (Grassi, 1991), hacen que su valor difiera espacial y temporalmente (Grassi, 1991; Elhakeem et al., 2018). Por ello, la determinación de este parámetro demanda procedimientos que ofrezcan la mejor aproximación y que estén en concordancia con las condiciones edafo-climáticas bajo las cuales funcionan eficazmente estos procedimientos (Reynolds et al., 2000).

Actualmente existen varias alternativas metodológicas para determinar la conductividad hidráulica en medios saturados (K_s), prácticamente todos basados en la ley de Darcy (Pfeiffer et al., 2008). Dentro de los procedimientos directos, éstos se clasifican entre los que se hacen en laboratorio, utilizando permeámetros de cargas constantes o variables; y los de campo, cuya mayoría tiene de fundamento la cuantificación temporal de la variabilidad de las láminas de agua en pequeñas perforaciones (pozos) que se hacen en el sitio de interés a través de medir la recuperación o disminución de estas láminas (Luna-Sáez et al., 2005). Estos últimos se clasifican entre los que requieren presencia de la freática (condiciones saturadas) y los que se llevan a cabo en ausencia de este nivel de agua en el subsuelo (Leitón, 1985; Gaviláñez, 2020).

Si bien en la literatura se indica una mayor aceptación de los métodos de campo sobre los de laboratorio en la determinación de K_s , atribuidos a la menor variabilidad que presentan los datos y debido a que se desarrollan bajo condiciones prácticamente inalteradas (Gabriels et al., 2006; Camacho-López et al., 2020), en estos métodos *in situ* existe la necesidad de equiparar el conocimiento de sus resultados con el fin de caracterizarlos y, en algún caso específico, ampliar el alcance de aplicabilidad de estos procedimientos en el diseño de obras de drenaje con la suficiente confianza en la exactitud de este parámetro.

Un valor de K_s totalmente alejado del valor real, o bien encarece el porque induce a instalar una densidad de drenes más allá de los necesarios, o bien produce de producción por la ubicación de drenes muy distanciados que no permitieron la evacuación de los excesos hídricos dentro del máximo tiempo de drenaje que presentaron los cultivos (Forero, 2000; Herrera et al., 2016).

En este contexto se ubica el método de los anillos infiltrómetros, ideado originalmente para evaluar la velocidad de infiltración y especialmente la infiltración básica (infiltración estabilizada) (Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1989; Prieto et al., 2006); pero que, bajo las condiciones de saturación en las que se llega a dicha infiltración estabilizada, luego de transcurrido un tiempo relativamente largo, será muy útil considerar este dato equivalente a la conductividad hidráulica (Philip, 1969; Castiglioni et al., 2018; Macías et al., 2018).

El uso de los anillos infiltrómetros para medir el valor de K_s de los suelos agrícolas se constituye en un beneficio adicional en los estudios de aptitud de suelos dado que su utilidad primigenia es la de cuantificar la infiltración básica, ésta última, considerada como uno de los elementos decisivos del diseño de sistemas de riego (Landini et al., 2007; Ruiz y Muñoz, 2022). En este sentido, es importante validarlo con un método de campo que haya sido establecido para medir este parámetro como el del pozo invertido (conocido también como método de Porchet), cuya característica sea el de no requerir presencia de freática (FAO, 1985; Macías et al., 2018), que fue lo más común en la fase de diseño de obras de drenaje, debido a que, en muchas instituciones, estos diseños se realizaron en épocas sin lluvias.

Además, con esto se ha tratado de afianzar la similitud de resultados entre el método de los anillos infiltrómetros y el del pozo invertido (Montecinos et al., 2008), siendo este último un procedimiento económico y de resultados aceptables (Worsa-Kozak y Chudy, 2019).

En función de lo que antecede se propuso esta investigación, con el fin de corroborar la semejanza de la infiltración básica obtenida a través del método de doble anillo con la conductividad hidráulica en medio saturado, cuyo valor referencial fue establecido mediante el método del pozo invertido.

Materiales y métodos

Descripción del área del ensayo

Este experimento se desarrolló en la época seca del año 2020, dentro del campus experimental de la Universidad Agraria del Ecuador (UAE), en un sitio de coordenadas UTM 17M 658599 9764812. El lote experimental tuvo una superficie de 35 m², dentro del cual se evaluaron las metodologías del doble anillo infiltrómetros y pozo invertido, realizando 15 pruebas de cada una en igual número de unidades experimentales en que se dividió el lote, cuyas medidas fueron de 1,2 m x 1,5 m. El suelo sobre el cual se realizaron las pruebas pertenece al orden de los vertisoles (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS), 2017), con una

textura del tipo franco-arcilloso, con una densidad aparente de $1,24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y con un contenido de materia orgánica de 0,78% según el reporte de análisis de suelo de la UAE.

Método del doble anillo

Los anillos utilizados tuvieron un diámetro de 33 cm y 56 cm, con una altura de 35 cm, contruidos en hierro galvanizado de 4 mm de espesor. Estos se hincaron hasta una profundidad de 10 cm y se operaron con carga variable entre 10 y 15 cm. Se tomaron lecturas de 2, 5, 10, 15 y 20 minutos, hasta completar una duración de 2 horas. Bajo este método, las evaluaciones se realizaron a 20 cm de profundidad. De acuerdo a la propuesta, la infiltración básica (I_b), considerada como conductividad hidráulica en condiciones saturadas (Ks), se obtuvo de forma analítica mediante la expresión:

$$I_b = K_s = a(-600b)^b \quad (1)$$

A pesar de que las evaluaciones de descenso de la lámina de agua en el anillo central y del tiempo se cuantificaron en mm y minutos, respectivamente, I_b en la expresión 1 ofrece resultados en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; desde donde se realizó la conversión respectiva a $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$. Los valores de a y b se obtuvieron de: $a = AB$, $b = B-1$. Los parámetros A y B se definieron al calcular la infiltración total (I_T) a partir de los mínimos cuadrados ordinarios de los datos transformados (ajuste logarítmico), según la ecuación de Kostiaikov (citada por Grassi, 1998), dada por:

$$I_T = At^B \quad (2)$$

Método del pozo invertido

En el caso de los pozos invertidos, éstos se perforaron a 60 cm de la periferia donde se instalaron los anillos, de tal manera que se pudieran aplicar las dos metodologías dentro de cada unidad experimental, para realizar las comparaciones en igualdad de condiciones. Los pozos tuvieron un diámetro de 6 cm y una profundidad de 60 cm desde el nivel del suelo. Las lecturas de descenso de carga en cada pozo se realizaron por triplicado, previo humedecimiento de los mismos durante una hora para crear las condiciones de saturación que el método requiere (P'kla y Ayite, 2020).

La expresión que se utilizó para calcular Ks en este método se fundamentó en la ley de Darcy (Romaña, 2014), considerando la existencia de flujo desde el fondo y de la pared de los pozos, además de que el gradiente de movilidad del flujo sea igual a la unidad, dada las condiciones de saturación que se asumen (Oosterbaan y Nijland, 1994; Elrick y Reynolds, 2002). Esta expresión, modificada por los autores para la obtención directa de Ks en unidades de $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$, fue:

$$K_s = \frac{216d}{t} \ln \left(\frac{4h_0 + d}{4h_1 + d} \right) \quad (3)$$

En la expresión 3, d representó al diámetro del pozo (6 cm), t el tiempo expresado en segundos, h_0 fue la carga inicial y h_1 fue la carga final, éstas dos últimas medidas en centímetros.

El procedimiento de lectura se realizó considerando un descenso de carga constante (15 cm) a través de un medidor flotante, contabilizando la variabilidad temporal en cada observación. Las

cargas de inicio (h_0) que se evaluaron en las 15 observaciones medias, tuvieron valores que oscilaron entre 37 y 58 cm; mientras que las cargas finales (h_1), tuvieron una variabilidad de 22 a 43 cm.

Desde la metodología del pozo invertido se obtuvo directamente la conductividad hidráulica, mientras que con la de los anillos lo que en realidad se midió fue la infiltración estabilizada (infiltración básica); no obstante, dada la condición de saturación bajo la cual ocurrió esta última, permitieron asumirla también como datos de conductividad hidráulica de acuerdo al criterio de Macías et al. (2018). Por ello la variable que se tomó de referencia para la comparación de las dos metodologías fue definida como conductividad hidráulica saturada.

Análisis de los datos

En el caso del método de doble anillo se generaron los modelos de regresión simple no lineal para cada una de las 15 observaciones, según la expresión 2, para la obtención de los parámetros A y B; verificándose la bondad de ajuste de cada uno de ellos mediante el coeficiente de determinación (R^2). En la comparación de los métodos se utilizó la prueba t de Student para muestras relacionadas (Montgomery, 2004) debido al espacio reducido de cada unidad experimental dentro de los cuales se probaron los dos métodos, por lo cual se consideró la existencia de correlación entre los resultados; lo que también fue corroborado mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Previamente se hizo una exploración de la dispersión de los datos mediante un diagrama de cajas y se comprobó la normalidad de los mismos mediante el test de Shapiro-Wilks. Estos análisis se realizaron con la ayuda de los complementos de Excel y del software Infostat.

Resultados y discusión

Una visualización gráfica y exploratoria de los datos, correspondientes a los de conductividad hidráulica saturada (Ks) que se obtuvieron en los dos métodos, puede observarse en la figura 1.

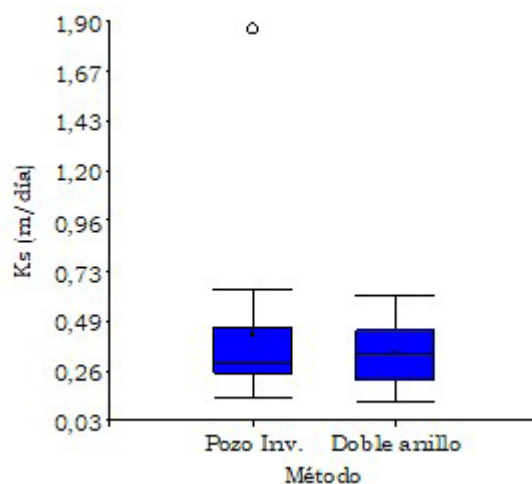


Figura 1. Diagrama de cajas para los dos métodos

El diagrama de caja del método del pozo invertido registró un dato disperso (outlier) que descuadró la normalidad de los mismos. Este dato correspondió a la repetición tres que se detalló en la tabla 1 y que mostró un valor de $1,8622 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$, posiblemente debido al contacto del pozo con alguna grieta que favoreció una infiltración relativamente rápida en dicho pozo. En cuanto a la información del método del doble anillo, se evidenció una uniformidad de mayor consistencia indicada a través del diagrama de caja, con ausencia de datos dispersos.

Tabla 1. Parámetros y conductividad hidráulica calculada bajo el método del pozo invertido.

Rep.	H + Y	Tiempo (s)	Carga inicial h_0 (cm)	Carga final h_f (cm)	Ks ($\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$)
1	64,4	1874	48,6	33,6	0,2461
2	60,5	3849	45,1	30,1	0,1308
3	56,0	339	37,4	22,4	1,8622
4	66,8	1121	51,8	36,8	0,3821
5	64,8	2332	51,6	36,6	0,1845
6	62,2	1453	48,0	33,0	0,3220
7	59,8	1643	46,7	31,7	0,2941
8	69,4	662	52,4	37,4	0,6385
9	62,5	804	49,7	34,7	0,5588
10	73,3	825	57,7	42,7	0,4590
11	65,6	1567	51,6	36,6	0,2746
12	68,5	1303	56,1	41,1	0,3000
13	66,3	2056	54,5	39,5	0,1965
14	64,6	1366	52,2	37,2	0,3108
15	56,3	2295	41,7	26,7	0,2409

Rep.= repetición, H+Y: Altura total a la línea horizontal de lectura en el medidor flotante.

En la tabla 1 se han detallado los parámetros que permitieron obtener la conductividad hidráulica saturada en el método del pozo invertido. En las 15 observaciones se manejaron tiempos variables desde 339 a 3849 segundos para la medición de 15 cm de descenso leídos entre la carga inicial y final de las diferentes unidades de observación. Al aplicar la expresión 3, se obtuvieron las lecturas mínima y máxima de 0,1308 a $1,8622 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$, respectivamente, de conductividad hidráulica. Es posible que el dato con un comportamiento extraordinario (outlier) ($1,8622 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$) haya ocurrido probablemente por defectos estructurales (rajaduras) en el suelo en donde se llevó a cabo este estudio. De forma general, es notoria la importante variabilidad de los datos que se observaron con este método (tabla 3) en la medición de Ks, aun en espacios reducidos (35 m^2) como en el que se desarrolló este ensayo.

El valor de los parámetros A y B de la ecuación potencial de Kostiakov (expresión 2), para las 15 observaciones obtenidas con el método del doble anillo, se detallan en la tabla 2. El ajuste de esta ecuación a los datos, generados por la infiltración acumulada (mm) versus el tiempo (minutos), en todas las evaluaciones realizadas fue significativo ($P<0,05$), con valores de R^2 por encima del 90%; lo cual corroboró lo mencionado por diversos autores respecto de la bondad de esta expresión para representar a los procesos de infiltración en el suelo (Grassi, 1991; Prieto et al., 2006; Ruiz y Muñoz, 2022). Si bien en este método no se registraron valores dispersos, también se pudo evidenciar una importante variabilidad en cuanto a Ks, registrándose un mínimo de $0,1133 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$ y un máximo de $0,6148 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$.

Tabla 2. Parámetros y conductividad hidráulica calculada bajo el método del doble anillo.

Rep.	A	B	Infiltración total (I_t)	R^2	a	b	Ks ($\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$)
1	1,1132	0,8321	$1,1132t^{0,8321}$	0,9074	55,5782	-0,1679	0,6148
2	3,3665	0,4759	$3,3665t^{0,4759}$	0,9209	96,1265	-0,5241	0,1133
3	4,6290	0,5562	$4,6290t^{0,5562}$	0,9809	154,4676	-0,4438	0,3108
4	0,7925	0,8015	$0,7925t^{0,8015}$	0,9806	38,1131	-0,1985	0,3542
5	1,4307	0,7153	$1,4307t^{0,7153}$	0,9876	61,3990	-0,2847	0,3409
6	1,4576	0,6436	$1,4576t^{0,6436}$	0,9882	56,2809	-0,3564	0,1995
7	0,6275	0,8039	$0,6275t^{0,8039}$	0,9799	30,2670	-0,1961	0,2852
8	0,9630	0,8265	$0,9630t^{0,8265}$	0,9801	47,7541	-0,1735	0,5119
9	0,7580	0,8729	$0,7580t^{0,8729}$	0,9824	39,6990	-0,1271	0,5493
10	1,5345	0,7435	$1,5345t^{0,7435}$	0,9659	68,4577	-0,2565	0,4515
11	1,5884	0,7167	$1,5884t^{0,7167}$	0,9843	68,3036	-0,2833	0,3826
12	1,4060	0,6596	$1,4060t^{0,6596}$	0,9907	55,6401	-0,3404	0,2183
13	1,6839	0,7150	$1,6839t^{0,7150}$	0,9859	72,2381	-0,2850	0,4004
14	0,9786	0,7011	$0,9786t^{0,7011}$	0,9536	41,1671	-0,2989	0,2095
15	1,6482	0,5987	$1,6482t^{0,5987}$	0,9831	59,2058	-0,4013	0,1573

Rep.= repetición.

En la etapa de diseño de los sistemas de drenaje agrícola, un requerimiento principal es que la conductividad hidráulica no presente una fuerte dispersión que podrían hacer que lotes sectorizados del campo no puedan evacuar los excesos dentro del tiempo límite que tienen los cultivos antes de que sus rendimientos mermen sustancialmente (Herrera et al., 2016). Desde este punto de vista, al tener coeficientes de variación superiores al 40% en los dos métodos, en un espacio relativamente reducido, se resaltó la importancia de la sectorización de un suelo agrícola con características homogéneas como una de las alternativas que favorecen valores de Ks de menor variabilidad (Grassi, 1991).

Separando el valor disperso de Ks establecido en uno de los métodos ($1,8622 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$), los rangos $0,1308$ a $0,6385 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$

y 0,1133 a 0,6148 $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$, obtenidos en el pozo invertido y en el doble anillo, respectivamente (tablas 1 y 2), no difirieron sustancialmente de los reportados por Smedema y Rycroft (1983) y Oosterbaan y Nijland (1994); quienes declararon un rango de 0,002 a 0,2 $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$ de K_s para suelos franco arcillosos como el del actual estudio, aunque sin precisar el método con el cual los definieron. En este sentido, podrán avalarse los dos métodos, los cuales fueron alternativas de campo para medir la conductividad hidráulica sin presencia de freática con mayor preferencia que los de laboratorio, dada la pérdida parcial o total de la estructura que se genera en estos últimos al tomar muestras de un reducido volumen que alteraron su condición (Grassi, 1991); con la salvedad de que el método de doble anillo puede ofrecer información adicional, no solo para el diseño de sistemas de drenaje sino también para el diseño de sistemas de riego.

Para mantener la normalidad y el balanceo de las muestras, se eliminó el dato de la repetición tres en los dos métodos, dado el valor outlier presente en el método del pozo invertido. Finalmente, los análisis comparativos se realizaron con 14 datos en cada procedimiento, según puede observarse en la tabla 3. Con la eliminación de un valor en los dos métodos, los datos presentaron normalidad de acuerdo al test de Shapiro-Wilks indicada en la tabla 3, reportando significancias arriba del 5% ($P>0,05$) en los dos casos. Los datos en los dos métodos reportaron una variabilidad sustancial, con valores muy parecidos en cuanto al coeficiente de variación (entre 44 y 45%).

Según lo detallado en la tabla 3, los datos obtenidos en los dos métodos estuvieron relacionados de manera significativa ($P<0,05$), de acuerdo el coeficiente de correlación de Pearson, cuyo valor fue de 0,54. Con base a esta relación, se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas, resultando con una diferencia no significativa entre los métodos ($P=0,6477$). Es decir, para las condiciones dadas en que se desarrolló el ensayo, lo resuelto por el método de doble anillo en cuanto a infiltración básica puede tomarse como K_s según el método del pozo invertido.

Al considerar el 44,1 y 44,9% como coeficientes de variación de los datos de K_s en los métodos de pozo invertido y de doble anillo, respectivamente (tabla 3), además de que el experimento se llevó a cabo en una superficie pequeña de apenas 35 m^2 dentro de la cual se distribuyeron los 15 sitios de evaluación, se reconoció la importante variabilidad que presentan estos dos métodos de campo en áreas más extensas (Luna-Sáez et al., 2005; Gabriels et al., 2006). Asimismo, cuando se incluyó el dato outlier obtenido en el método del pozo invertido, fue notoria la mayor variabilidad que presentó esta alternativa; dejando entrever que, si un método abarca una mayor superficie localizada (o volumen de influencia) en el proceso de cuantificar la infiltración, presenta una mayor uniformidad en sus lecturas (Gupta et al., 1993; Prieto et al., 2006). Esto último, se debió a la alta sensibilidad que se evidenció en el método del pozo invertido respecto al cambio de estructura de un suelo o cuando el hoyo entró en contacto con cavidades internas que hicieron que las lecturas variaran indiscriminadamente (Alvarado y Barahona-Palomo, 2016), dado su menor volumen de influencia en comparación con el método del doble anillo.

Tabla 3. Estadígrafos y prueba t de muestras relacionadas para los datos de los métodos de doble anillo y pozo invertido.

Estadísticos	Pozo invertido	Doble anillo
Observaciones	14	14
Media ($\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$)	0,3242	0,3421
Varianza	0,0204	0,0236
Coeficiente de variación (%)	44,1	44,9
Test Shapiro-Wilks (p-valor)	0,2668	0,6013
Coeficiente de correlación de Pearson	0,5373	
Coeficiente de correlación de Pearson (p-valor)	0,048	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	13	
Estadístico t	-0,4678	
P($T\leq t$) una cola	0,3239	
Valor crítico de t (una cola)	1,7709	
P($T\leq t$) dos colas	0,6477	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1604	

Es importante observar las condiciones dentro de las cuales la diferencia de K_s , entre las medias de 0,3242 $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$ obtenidas con el método del pozo invertido y el valor de 0,3421 $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$ del método del doble anillo, no resultó significativa ($P>0,05$) (tabla 3). Considerando el cilindro central del método de doble anillo, la superficie expuesta a la infiltración fue de 855,3 cm^2 (diámetro de 33 cm) con una carga media de 12 cm que fue la que se mantuvo en las evaluaciones; mientras que, en el pozo invertido la superficie expuesta fue de 310,3 cm^2 (área del fondo y de la parte cilíndrica del hoyo) y la carga media fue de 43 cm. En este contexto, se presumió una incidencia de la carga en el método del pozo invertido que favoreció lecturas similares a las del doble anillo, contrario a lo manifestado por varios autores que indicaron que éste último generalmente ofrece valores más altos de K_s (Macías et al., 2018). Además, a esta igualdad estadística en las lecturas de los métodos evaluados puede también haber contribuido la bi-dirección (vertical y horizontal) del flujo de infiltración que ocurrió en el pozo invertido, no así en el de doble anillo, en el cual se supuso que la infiltración del cilindro central fue únicamente vertical (Luna-Sáez et al., 2005; Macías et al., 2018).

La correlación significativa ($P=0,048$) entre los dos métodos evaluados, similar a lo reportado por Montecinos et al. (2008), y aun siendo el espacio bastante reducido dentro del cual se aplicaron los procedimientos, dejaron entrever la sensibilidad de dichos métodos a la heterogeneidad espacial de los suelos y una aparente indiferencia entre las ventajas y las desventajas que pudieran primar en uno de ellos sobre el otro (Gabriels et al., 2006). Bajo esta apreciación, si bien los dos métodos evaluados estuvieron influenciados por el tipo de agua que se utilizó en las

pruebas, especialmente cuando el suelo tiene cierta característica salobre, la metodología del pozo invertido es más dependiente del proceso en cuanto a la elaboración y características del hoyo, tiempo de saturación previa y de la duración del ensayo (FAO, 1985); por lo tanto, podría asumirse que el método de doble anillo tuvo una mejor perspectiva en la definición de la conductividad hidráulica saturada.

Conclusiones

Siempre que el método de doble anillo exponga una mayor superficie de infiltración que le permita ser menos susceptible a defectos internos del suelo en comparación con el método del pozo invertido, éste último con 6 cm de diámetro, 60 cm de profundidad y bajo las cargas hidráulicas consideradas en el actual estudio, puede declararse una mayor ventaja del primero en suelos franco arcillosos. En cuanto a precisión, librando las condiciones puntuales del suelo que podrían interferir en el método del pozo invertido y bajo los lineamientos en que se llevó esta investigación, los dos métodos son aceptables.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, C. y Barahona-Palomo, M. (2016). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00023.pdf>
- Camacho-López, N., Zabala-Alarcón, N. y Flores-Carpio, Y. (2020). Estimación del coeficiente de permeabilidad del suelo en la ciudad de Macas-Ecuador utilizando permeámetro de carga variable. *Dominio de las Ciencias*, 6(3), 78-94. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1275>
- Castiglioni, M., Behrends, F. y Marquez, J. (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 158-169. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1850-20672018000200015
- Elhakeem, M., Papanicolaou, T., Wilson, C., Chang, Y.-J., Burras, L., Abban, B., Wysocki, D. and Wills, S. (2018). Understanding saturated hydraulic conductivity under seasonal changes in climate and land use. *Geoderma*, 315, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.011>
- Elrick, D. and Reynolds, W. (2002). Measuring water transmission parameters in vadose zone using ponded infiltration techniques. *Agricultural Sciences*, 7(2), 17-22. <https://journals.squ.edu.om/index.php/jams/article/view/598/599>
- Forero, J. (2000). *Conductividad hidráulica para drenaje de campos agrícolas*. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Gabriels, D., Lobo, D. y Pulido, M. (2006). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos*, 14(1), 7-22. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/980/909
- Gavilánez, F. (2020). *El drenaje agrícola y sus elementos de diseño*. Quito, Ecuador: Editorial Mawil.
- Grassi, C. (1991). *Drenaje de tierras agrícolas*. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).
- Grassi, C. (1998). *Fundamentos del riego*. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).
- Gupta, R., Rudra, R., Dickinson, W., Patni, N. and Wall, G. (1993). Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. *Transactions of the ASAE*, 36(1), 51-55. doi: 10.13031/2013.28313
- Herrera, J., Duarte, C., González, F y Cid, G. (2016). Efecto del exceso de humedad del suelo sobre el rendimiento en algunos cultivos de importancia agrícola en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, 6(2), 3-7. <https://www.redalyc.org/revista.oa?id=5862>
- Landini, A., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D. y Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del Suelo*, 25(2), 123-131. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a03.pdf>
- Leitón, J. (1985). *Riego y drenaje*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Luna-Sáez, D., Sánchez-Reyes, C. y Muñoz-Pardo, J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada de campo. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(2), 95-107. http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1040/pdf_1
- Macías, J., Vargas, A. y Arellano, F. (2018). Conductividad hidráulica en dos sitios del Valle Central de Costa Rica: análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada. *Revista Geológica de América Central*, 59, 75-100. <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34160>
- Montecinos, A., Montalva, G. y Vargas, J. (2008). Comparación y proposición de métodos para determinar la conductividad

- hidráulica en arenas limosas. *Ingeniería Hidráulica en México*, 28(2), 147-152. <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/152>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. 2da. Ed. México D.F., México. Editorial Limusa S. A.
- Oosterbaan, R. and Nijland, H. (1994). Determining the saturated hydraulic conductivity. pp. 435-475. In: Ritzema, H. (Ed.). *Drainage principles and applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).
- Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1985). *Elementos para el proyecto de drenajes*. Roma, Italia: FAO.
- Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1989). *Métodos de riego*. Roma, Italia: FAO.
- P'kla, A. and Ayite, Y. M. X. (2020). Comparative analysis of broukou and kpassidè (togo) clay soils permeability coefficient measured from Porchet and variable load permeameter tests. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*, 18, 127-133. <https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2020/ANNALS-2020-2-15.pdf>
- Pfeiffer, M., Haberland, J., Kremer, C. y Seguel, O. (2008). Comparación de dos métodos alternativos al pozo barreno para la medición de la conductividad hidráulica saturada (Ks) en un alfisol. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(3), 49-56. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000300005>
- Philip, J. (1969). Theory of infiltration. *Advance in Hydrosience*, 5, 215-296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>
- Prieto, B., Tamara, R. y Peroza, J. (2006). Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del SINU (Córdoba, Colombia). *Revista Temas Agrarios*, 11(2), 36-44. <https://doi.org/10.21897/rta.v11i2.643>
- Reynolds, D., Bowman, B., Brunke, R., Drury, C. and Tan, C. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 478-484. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642478x>
- Romaña, J. (2014). *Los límites de la ley de Darcy*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional-UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51282>
- Ruiz, V. y Muñoz, C. (2022). Determinación de velocidad de infiltración básica en tres áreas de ladera: Roldanillo, Dagua y Pradera en Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 71(2), 130-138. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.83572>
- Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica [SIGTIERRAS]. (2017). *Mapa digital, órdenes de suelos del Ecuador*. pp. 7-8. Quito, Ecuador. Ministerio de Agricultura y Ganadería. http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA_MAPA_DE_ORDENES_DE_SUELOS_MAG_SIGTIERRAS.pdf
- Smedema, L. K. and Rycroft, D. W. (1983). *Land drainage-planning and design of Agricultural Drainage Systems*. Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Worsa-Kozak, M. and Chudy, K. (2019). *Estimation of hydraulic conductivity of artificial fine-grained soil based on Porchet method-example of Tailings Pond "Gilów", sw Poland (Conference)*. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, Bulgaria. DOI:10.5593/sgem2019/1.2/S02.028

Contribución de los autores

Autores	Contribución
Freddy Carlos Gavilánez Luna	Diseño de la investigación, revisión bibliográfica, análisis e interpretación de los datos, preparación y edición del manuscrito.
Luis Saúl San Martín Larrea	Montaje del experimento, toma e interpretación de los datos, revisión del contenido del manuscrito.

