



XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Suelos... Huellas del pasado, desafíos del futuro

San Fernando del Valle de Catamarca,
Prov. de Catamarca, Argentina
21 al 24 de mayo de 2024



EFFECTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA SOBRE LA REDISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

Bellora, G.L.¹; Polich, N.G.^{1,2*}; C.G. Soracco^{1,2}; R. Villarreal^{1,2}; M.P. Salazar^{1,2}; M. Barraco³; M. Cicchino³; L.A. Lozano^{1,2}

¹ Laboratorio de Física de Suelos (LaFiS), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP;
² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina; Argentina; ³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); * Calles 60 y 119 (1900) La Plata, Prov. de Buenos Aires, Argentina, polichnicolas@gmail.com

RESUMEN: El conocimiento de la redistribución de la humedad del suelo y el fenómeno de histéresis relacionado (ya que se producen simultánea o secuencialmente procesos de humedecimiento y secado) es necesario para saber si el agua llega eficazmente a la zona radical de los cultivos o de la vegetación natural o si el agua y los solutos penetran por debajo de la zona radical. Muchos autores concluyeron que idealmente, la redistribución del agua en los perfiles del suelo debería evaluarse midiendo no sólo el contenido de agua sino también el potencial agua del suelo. Por ello se desarrolló un setup de laboratorio basado en los métodos de evaporación simplificado y de mini infiltración horizontal, utilizando mini tensiómetros para la medición del potencial mátrico. Se estudiaron tres sitios con diferentes texturas de la región pampeana, Chascomús (suelo de textura franca), Pergamino (textura franco limosa), y Gral. Villegas (textura franco arenosa) y se extrajeron muestras no disturbadas en columnas. Se obtuvieron curvas de secado y de humedecimiento y se calculó un indicador del grado de histéresis. Se determinó el tiempo de redistribución y se propuso como un indicador para caracterizar el proceso de redistribución de agua en el suelo en un rango de saturación media y analizar el efecto de la incorporación de cultivos de cobertura (CC). Al influir en la configuración del espacio poroso y el movimiento de agua en el suelo se encontró que la inclusión de CC aumenta el fenómeno de histéresis de la curva de retención hídrica y produce un retardo en la redistribución de agua en el suelo.

PALABRAS CLAVE: histéresis, mini infiltración, método de evaporación simplificado.

INTRODUCCIÓN

El aumento global de sequías e inundaciones en la última década ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar el conocimiento y la parametrización de los procesos hidrológicos del suelo (Vereecken et al., 2022). Varios autores han reportado que la disminución de la calidad física del suelo puede limitar la profundidad y el volumen del suelo explorado por las raíces para absorber agua y nutrientes (Chen et al., 2014). Una alternativa de manejo para mitigar los efectos negativos y preservar la fertilidad física de los suelos es la incorporación de cultivos de cobertura (CC) a la secuencia de cultivos, generando una alteración del sistema poroso. Esta alteración afecta directamente la redistribución del agua dentro del perfil del suelo y hacia las raíces de las plantas, que es un proceso complejo y ha sido poco estudiado, particularmente en los suelos de nuestro país. En este proceso el humedecimiento y el secado se producen simultánea o secuencialmente en varias partes del perfil del suelo. Es posible tener dos capas de suelo de idéntica textura y estructura en equilibrio entre sí y, sin embargo, pueden diferir en humedad si sus historias de humedecimiento han sido diferentes (Hillel, 1982). Por lo tanto, es importante estudiar el efecto de histéresis de la curva de retención hídrica (CRH) (relación entre el contenido volumétrico de agua del suelo (θ) y el potencial mátrico (h)) y estudiar la redistribución para saber si el agua llega eficazmente a la zona radical



de los cultivos. Numerosos estudios a lo largo de los años se han centrado en los procesos básicos de la redistribución de la humedad del suelo y los procesos de histéresis relacionados, tanto experimentalmente como mediante análisis numéricos. La mayoría de estos estudios se refieren a la redistribución después de la infiltración en perfiles verticales de suelo o columnas de suelo de laboratorio, mientras que varios estudios experimentales también investigaron la redistribución horizontal de la humedad (Philip, 1991; Vachaud y Thony, 1971; Zhuang et al., 2017). Muchos autores concluyeron que idealmente, la redistribución del agua en los perfiles del suelo debería evaluarse midiendo no sólo el contenido de agua sino también el potencial agua del suelo, examinando así críticamente la naturaleza histerética de la relación θ vs h (Biswas et al., 1966; Kargas et al., 2021). En la Región Pampeana no existen estudios que atiendan el fenómeno de histéresis al momento de estudiar y analizar la CRH para caracterizar el espacio poroso de los suelos. Tampoco se ha reportado la implicancia que tiene este fenómeno sobre el proceso de redistribución del agua en el suelo y menos aún el efecto que tiene la incorporación de CC sobre esta dinámica. En este trabajo se plantean las siguientes hipótesis y objetivos:

Hipótesis

- i. La inclusión de CC modifica el fenómeno de histéresis de la CRH del suelo;
- ii. La redistribución del agua en el suelo es retardada por el efecto de histéresis.

Objetivos

- i. Evaluar el efecto de la inclusión de CC sobre la histéresis en distintos tipos de suelos a partir de muestras no disturbadas obtenidas en dos direcciones;
- ii. Cuantificar y analizar el proceso de redistribución de agua en distintos tipos de suelos con y sin CC relacionándolo con el comportamiento histerético que presentan.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio y tratamientos

Los ensayos se realizaron en tres sitios representativos de la Región Pampeana, con suelos de texturas diferentes. Los tres sitios pertenecen a ensayos de las Estaciones Experimentales del INTA ubicadas en las ciudades de Chascomús, Pergamino y General Villegas. En todos los sitios se evaluaron tratamientos con barbecho desnudo (BD) y tratamientos con CC (BC). En la Tabla 1 se resumen las características de los suelos estudiados y los CC.

Tabla 1. Principales características de los ensayos experimentales.

Sitio	Textura	Cultivo de cobertura
Chascomús (CHA)	franca	avena/trigo
Pergamino (PER)	franco limosa	avena/vicia
Gral. Villegas (VIL)	franco arenosa	centeno

La textura corresponde al horizonte A del perfil

En cada sitio se seleccionaron parcelas adyacentes con la misma posición relativa en el paisaje de cada tratamiento. En cada una de estas parcelas se seleccionó un área homogénea y representativa de 5 × 5 m en el centro de cada tratamiento, evitando huellas de ruedas visibles. Dentro de esta área, los sitios fueron seleccionados al azar para llevar a cabo el muestreo de suelo. En cada sitio y tratamiento se extrajeron tres muestras no disturbadas en columnas (8 cm de altura, 2,5 cm de diámetro, 39,3 cm³ de volumen) en los primeros 10 cm del horizonte A.

Determinación de la curva de retención hídrica de secado y de humedecimiento

Las muestras de suelo se saturaron desde el fondo durante 48 h y luego se colocaron horizontalmente en una balanza analítica ($\pm 0,01$ g), con un extremo sellado (lado izquierdo) y la otra cara (derecha) abierta para permitir un proceso de libre evaporación (Figura). Se insertaron dos minitensiómetros (Tensiómetro T5, METER Group, Inc. EE. UU.) a una distancia de 2 y 6 cm (desde el lado izquierdo) en la muestra de suelo. La prueba se llevó a cabo en condiciones de laboratorio (la temperatura osciló entre 20 y 24 °C) y se registraron la masa de la muestra (m) y la tensión del suelo (h) a intervalos de 5 minutos. El proceso de

evaporación se produjo hasta alcanzar un valor de tensión cercano a los 10 m en el tensiómetro derecho. Finalizado el proceso de secado se selló la cara derecha iniciándose así un proceso de redistribución de la humedad de la muestra. La balanza continuó registrando para verificar que no hubo pérdida en la masa de la muestra. El proceso continuó hasta que se igualaron los valores de h en ambos tensiómetros, tomando de 12 a 24 horas dependiendo de la muestra. Luego de esto, se abrió el lado izquierdo de la columna y se conectó un mini-infiltrómetro (Figura). La infiltración lateral de agua se determinó con el mini-infiltrómetro (Soracco et al., 2019). Para capturar cambios en las tensiones, el intervalo de registro de datos se redujo a 2 minutos. El proceso finalizó una vez saturada la muestra, evidenciado por valores de h cercanos a 0 m en ambos tensiómetros.

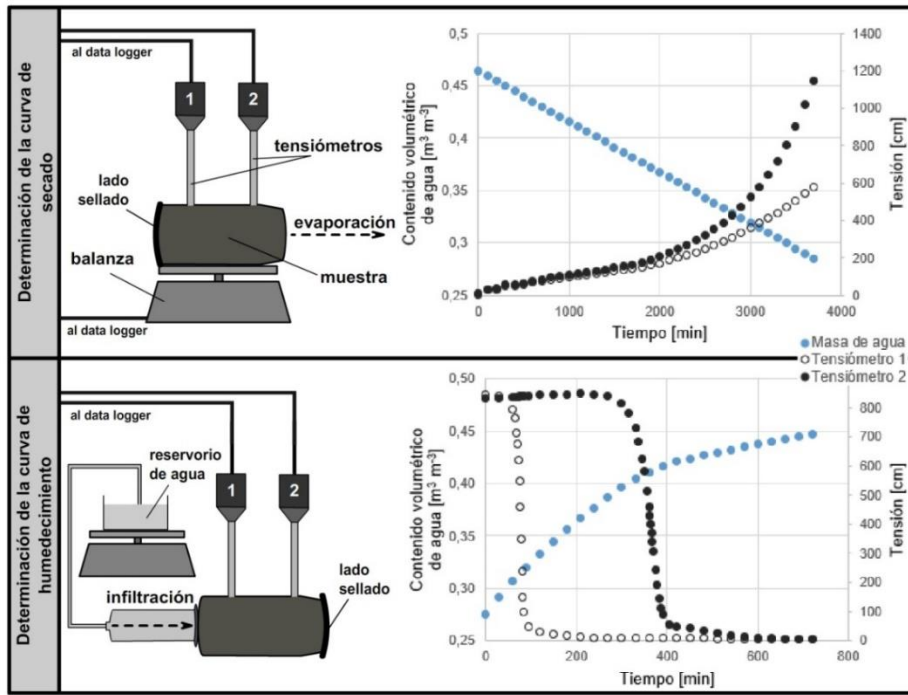


Figura 1. Metodología de laboratorio configurada para la determinación de la curva de retención de agua del suelo por secado y humedecimiento en una columna de suelo y su respectiva evolución de los parámetros medidos para una muestra representativa.

Para la determinación de la CRH se hicieron los siguientes supuestos: El flujo se asumió estacionario, ya que el flujo y el gradiente hidráulico fueron aproximadamente constantes durante el intervalo de tiempo evaluado y la humedad a lo largo de la columna se asume lineal para los procesos de secado y humedecimiento durante el intervalo de tiempo evaluado (Schindler et al., 2010). Los puntos individuales de la curva de retención de agua se calcularon a partir de la diferencia de volumen agua (ΔV) de la muestra en el momento t_i y se relacionaron con la tensión media, que se calculó como:

$$\bar{h}_i = \frac{h_1(t_i) + h_2(t_i) + h_1(t_{i+1}) + h_2(t_{i+1})}{4} \quad (1)$$

donde h_1 es la tensión en el tensiómetro ubicado a 2 cm y h_2 es la tensión en el tensiómetro ubicado a 6 cm desde el lado izquierdo de la muestra.

Para los procesos de secado y humedecimiento, los valores de θ en cada valor de h $\theta(\bar{h}_i)$ se calcularon siguiendo las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$\theta_i(\bar{h}_i) = \theta_s - \Delta\theta_i \quad (2)$$

$$\theta_i(\bar{h}_i) = \theta_f + \Delta\theta_i \quad (3)$$

donde θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación correspondiente a $h=0$, θ_r es el contenido volumétrico de agua final del proceso de secado, y $\Delta\theta_i$ es el cambio en el contenido de agua calculado como:

$$\Delta\theta_i(\bar{h}_i) = \frac{\Delta V(h_i)}{2 V_T} \quad (4)$$

donde V_T es el volumen total de pérdida de agua. Los datos de retención de agua para el proceso de secado se ajustaron por separado al modelo bimodal de van Genuchten (Durner, 1994). Se cuantificó la magnitud de la histéresis (H) definido como la relación entre la diferencia máxima ($\Delta\theta_{max}$) en el contenido volumétrico de agua entre la curva de secado y humedecimiento y la diferencia entre θ_s y θ_r (Rafrat et al., 2016) como:

$$H = \frac{\Delta\theta_{max}}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

Entre los procesos de secado y humedecimiento, la muestra se selló por ambos lados dando lugar al proceso de redistribución del contenido de agua de la muestra. Philip (1991) planteó un experimento parecido donde una muestra horizontal tenía diferentes θ en el lado izquierdo y derecho de la muestra y el agua se redistribuía desde la parte izquierda a la parte derecha sin flujo de entrada o salida de la muestra. En el experimento planteado en la presente tesis se observó este proceso de redistribución evidenciado por los valores del potencial mátrico de los dos tensiómetros. En la Figura se observa este proceso para una muestra representativa.

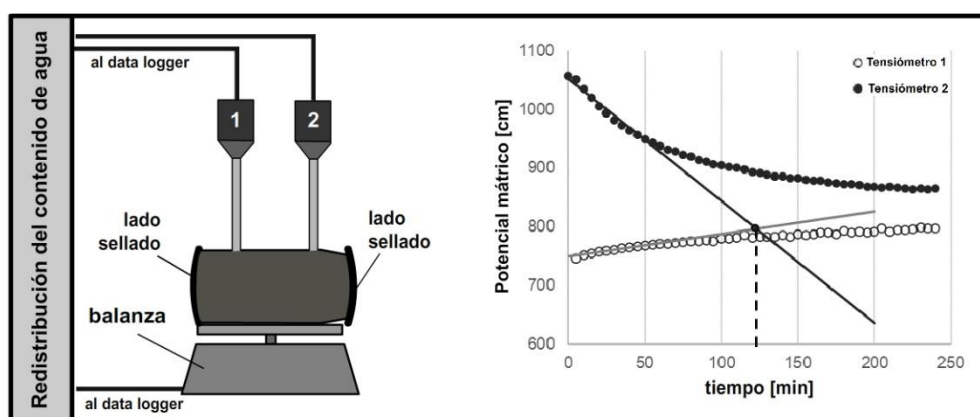


Figura 2. Redistribución del contenido de agua en la muestra y su respectiva evolución de los parámetros medidos para una muestra representativa.

Se determinó el tiempo al cual sucede la intersección de las regresiones de los primeros minutos del potencial mátrico en función del tiempo del tensiómetro 1 y el tensiómetro 2 (Figura 2). Al dividir ese tiempo por la distancia a la que se encuentran los tensiómetros se obtiene el tiempo de redistribución del agua del suelo (t_{Red}) [$T L^{-1}$]. Esta variable se propuso como un indicador para caracterizar el proceso de redistribución de agua en el suelo en un rango de saturación media y analizar el efecto de la incorporación del CC.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 2 se muestran los valores del índice de histéresis H calculado según la ecuación 5 para los distintos sitios y tratamientos.

Tabla 2. Valores de grado de histéresis (H) para los distintos sitios de estudio (Chascomús, CHA; Pergamino, PER y Gral. Villegas, VIL) y tratamientos (sin cobertura, BD; con cobertura, BC). Las letras mayúsculas indican diferencias significativas entre sitios de estudio (LSD, $p < 0,05$). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamiento particionado por sitios (LSD, $p < 0,05$).

Sitio	Tratamiento	H [-]
-------	-------------	-------

CHA	BD	0,06	A	a
	BC	0,05		a
PER	BD	0,05	B	a
	BC	0,19		b
VIL	BD	0,14	C	a
	BC	0,28		b

Los valores obtenidos se encontraron en el rango de 0,02 a 0,28. Rafrat et al. (2016) reportaron un valor máximo de 0,46 para un suelo arcilloso. El resultado del ANOVA indica que existió un efecto del factor sitio para la variable H. El orden fue el siguiente: CHA<PER<VIL ($p<0,05$). El comportamiento histerético fue mayor en los suelos de textura más gruesa. Respecto al efecto de la incorporación del CC se observaron diferencias significativas en los sitios PER y VIL donde los valores de H para el tratamiento BC fueron mayores respecto al tratamiento BD ($p<0,05$). Estos resultados indican que el fenómeno de histéresis puede ser afectado por prácticas de manejo que afecten la estructura y funcionalidad del sistema poroso. Bondí y Castellini (2022) estudiando los efectos de enmiendas de compost en la calidad física del suelo, reportaron que, al aumentar el contenido de compost, aumentó el comportamiento histerético, lo que significa una mayor entrada de agua en el suelo durante un proceso de humedecimiento. En la Tabla 3 se muestran los valores del tiempo de redistribución (tRed) calculado para los distintos sitios y tratamientos.

Tabla 3. Valores de tiempo de redistribución (tRed) para los distintos sitios de estudio (Chascomús, CHA; Pergamino, PER y Gral. Villegas, VIL) y tratamientos (sin cobertura, BD; con cobertura, BC). Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos particionado por sitio (LSD, $p<0,05$).

Sitio	Tratamiento	tRed	
		[min cm suelo ⁻¹]	
CHA	BD	38	a
	BC	70	b
PER	BD	38	a
	BC	98	b
VIL	BD	46	a
	BC	41	a

En CHA y PER el valor de tRed fue mayor en BC respecto a BD ($p<0,05$). Esto indica que la incorporación del CC generó un proceso más lento de redistribución. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de la histéresis sobre el gradiente de potencial hidráulico del suelo, que se hace igual a cero poco después del inicio de la redistribución debida a la histéresis (Kargas et al., 2021). En los últimos años muchos autores reportaron, que contrariamente a los paradigmas existentes, este retardo en el movimiento del agua puede ser algo positivo para las plantas, ya que induce el cierre de estomas, disminuyendo la transpiración y por lo tanto el consumo de agua (Ahmed et al., 2017). A partir del análisis de los resultados de correlación se observó que la variable tRed se correlacionó positivamente con el grado de histéresis en todos los sitios estudiados (coeficiente de 0,37 y $p<0,05$). Esto puede tener importancia para la disponibilidad de agua a través de la absorción por las raíces de las plantas. Kargas et al. (2021) confirmaron que la inclusión de histéresis provoca un gran retraso en el proceso de redistribución y, en consecuencia, a la pérdida del agua del suelo de la zona radical del suelo donde estaba originalmente almacenada.

CONCLUSIONES

Hipótesis i: La inclusión de CC modifica el fenómeno de histéresis de la CRH del suelo.

En base a los resultados no se rechaza la hipótesis i ya que la inclusión de CC aumenta el fenómeno de histéresis de la CRH especialmente en suelos de textura gruesa;

Hipótesis ii: La redistribución del agua en el suelo es retardada por el efecto de histéresis.

En base a los resultados obtenidos no se rechaza la hipótesis ii dado que los suelos con mayor grado de histéresis presentan un retardo en la redistribución del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, M. A., Zarebanadkouki, M., Ahmadi, K., Kroener, E., Kostka, S., Kaestner, A., & Carminati, A. (2018). Engineering rhizosphere hydraulics: pathways to improve plant adaptation to drought. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-12.
- Biswas, T. D., Nielsen, D. R., y Biggar, J. W. (1966). Redistribution of soil water after infiltration. *Water Resources Research*, 2(3), 513–524.
- Bondí, C., y Castellini, M. (2022). Compost amendment impact on soil physical quality estimated from hysteretic water retention curve. *Water*, 14(7), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w14071002>
- Chen, Y. L., Palta, J., Clements, J., Buirchell, B., Siddique, K. H. M., y Rengel, Z. (2014). Root architecture alteration of narrow-leaved lupin and wheat in response to soil compaction. *Field Crops Research*, 165, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211–223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Hillel, D. (1982). Introduction to soil physics (Academic P).
- Kargas, G., Soulis, K. X., y Kerkides, P. (2021). Implications of hysteresis on the horizontal soil water redistribution after infiltration. *Water* (Switzerland), 13(19). <https://doi.org/10.3390/w13192773>
- Philip, J. R. (1991). Horizontal redistribution with capillary hysteresis. *Water Resources Research*, 27(7), 1459–1469. <https://doi.org/10.1029/91WR00780>
- Rafraf, S., Guellouz, L., Guiras, H., y Bouhlila, R. (2016). Quantification of hysteresis effects on a soil subjected to drying and wetting cycles. *International Agrophysics*, 30(4), 493–499. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0020>
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., y Müller, L. (2010). Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1071. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0358>
- Soracco, C. G., Villarreal, R., Melani, E. M., Oderiz, J. A., Salazar, M. P., Otero, M. F., Irizar, A. B., y Lozano, L. A. (2019). Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of conventional and no-till systems determined using a simple laboratory device. *Geoderma*, 337(August 2018), 1236–1244. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.045>
- Vachaud, G., y Thony, J. L. (1971). Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents. *Water Resources Research*, 7(1), 111–127.
- Vereecken, H., Amelung, W., Bauke, S. L., Boga, H., Brüggemann, N., Montzka, C., Vanderborght, J., Bechtold, M., Blöschl, G., Carminati, A., Javaux, M., Konings, A. G., Kusche, J., Neuweiler, I., Or, D., Steele-Dunne, S., Verhoef, A., Young, M., y Zhang, Y. (2022). Soil hydrology in the Earth system. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3(9), 573–587. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00324-6>
- Zhuang, L., Hassanizadeh, S. M., Klingeld, P. J., y van Genuchten, M. T. (2017). Revisiting the horizontal redistribution of water in soils: Experiments and numerical modeling. *Water Resources Research*, 53(9), 7576–7589. <https://doi.org/10.1002/2017WR020410>