

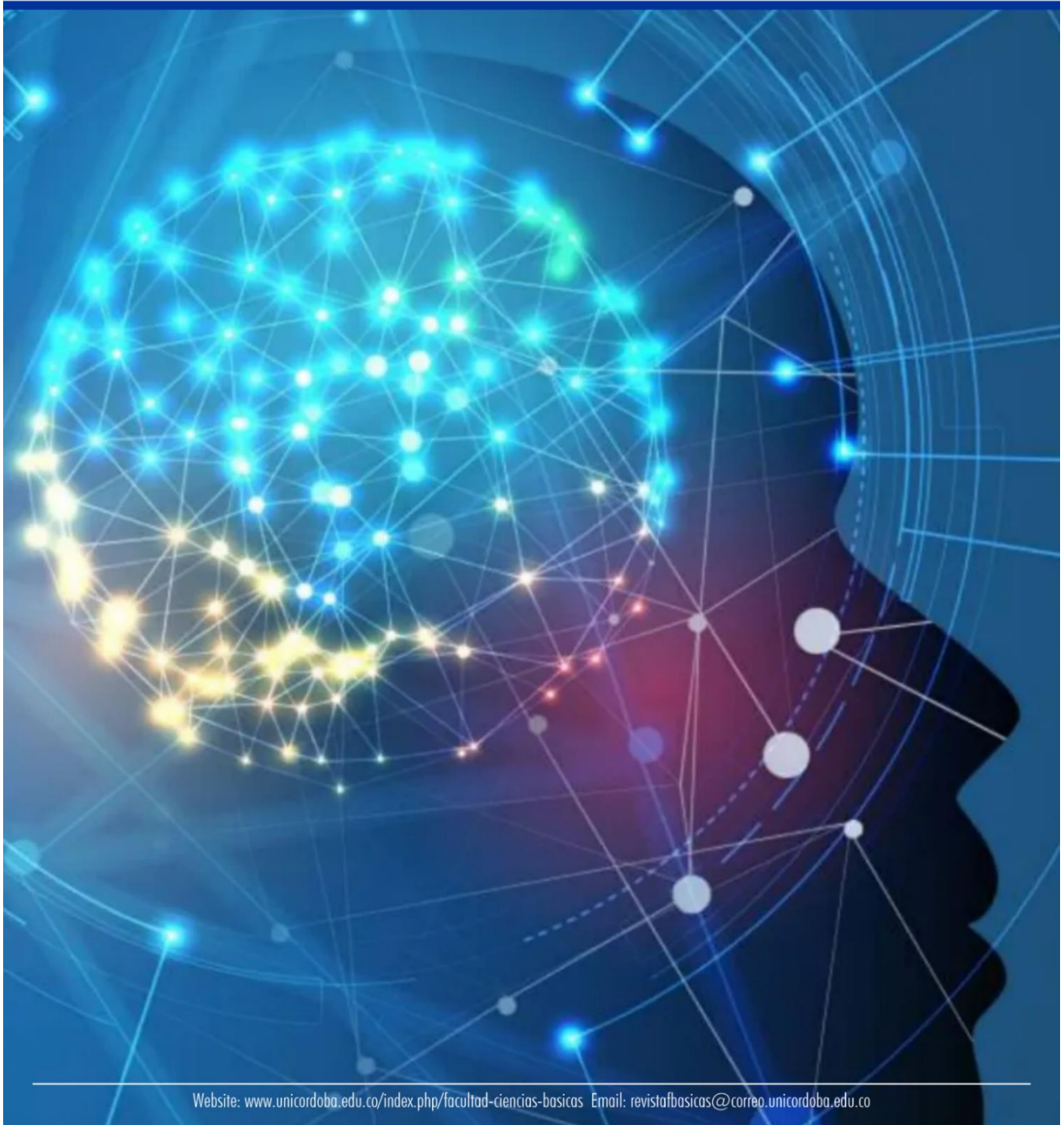


UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA



RFCB Revista Facultad de Ciencias Básicas

Volumen 1- Edición digital N°001 ISSN: 2805-7821



Website: www.unicordoba.edu.co/index.php/facultad-ciencias-basicas Email: revistafbasicas@correo.unicordoba.edu.co

Estimation of soil surface moisture by direct and indirect methods and its effect on scale

Estimación de la humedad superficial del suelo por métodos directo e indirecto y su efecto en la escala

Doris H. SERRANO A¹.

¹Universidad de Córdoba – Colombia, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Geografía, E-mail: dhelena@correo.unicordoba.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9190-7385>.

Recibido: septiembre 24 de 2021

Aceptado: octubre 25 de 2021

Publicado: noviembre 19 de 2021

Abstract

This study statistically compared 2211 estimates of soil surface volumetric moisture (*HS*) by gravimetric method, with 88 *HS* estimates by indirect determination of in situ water potential, in sampling units in the Quindío River basin (Colombia), during seven evaluation periods. The Heronian average of the gravimetric *HS*, conglomerates, non-parametric longitudinal variance and a non-linear model were analyzed. Five strata were formed that presented clear distinction with p-value < 0.00001, there was no relative effect to time and a determination coefficient of 68% was obtained. In conclusion, it is considered that the estimation of *HS* by direct or indirect measurement are substitute methods and do not present scale effect, because it maintains the same support and amplitude, even with different spacing of sampling points.

Keyword: Soil moisture, Water potential, Scale, Heronian average

Resumen

Este estudio comparó estadísticamente 2211 estimaciones de humedad volumétrica superficial del suelo (*HS*) por método gravimétrico, con 88 estimaciones de *HS* por determinación indirecta del potencial de agua in situ, en unidades de muestreo en la cuenca del río Quindío (Colombia), durante siete periodos de evaluación. Se analizó el promedio heroniano de la *HS* gravimétrica, conglomerados, varianza no paramétrica longitudinal y un modelo no lineal. Se conformaron cinco estratos o cluster que presentaron clara distinción con p-valor < 0.00001, no se presentó efecto relativo al tiempo y se obtuvo un coeficiente de determinación de 68%. En conclusión, se considera que la estimación de la *HS* por medición directa o indirecta son métodos sustitutivos y no presentan efecto escala, por mantener un mismo soporte y amplitud, aun con diferente espaciado de puntos de muestreo.

Palabras claves: Humedad del suelo, Potencial de agua, Escala, Promedio heroniano.

INTRODUCCIÓN

La *HS* es una componente fundamental del sistema terrestre, influye en la dinámica hídrica, los flujos de energía y carbono entre la superficie de la tierra y la atmósfera y determina la distribución de procesos hidrológicos como la escorrentía, infiltración y acumulación de agua en el suelo (Peng and Loew,

2017; Tuttle and Salvucci, 2014; Kerr et al., 2016). En estudios relacionados con el clima, la *HS* es una variable que influye en los procesos de evaporación, transpiración de la vegetación y transferencia de calor y masa entre la tierra y la atmósfera (Pla, 2010). En la ecología la *HS*, es una variable que regula el intercambio entre ecosistemas y es una variable

agrícola que interviene en el balance hídrico e influye en la seguridad alimentaria (Ochsner *et al*, 2013).

La *HS* puede medirse a partir de métodos e instrumentos que permiten determinar el contenido de agua (w) o el potencial hídrico del suelo (Ψ_c). Los métodos utilizados pueden ser directos e indirectos, requiriendo los directos, unidades de estudio representativas, para tomar cantidades de muestras de suelo que deben ser analizadas en laboratorio. Los métodos indirectos utilizan instrumentos para medir otras propiedades del suelo relacionadas con la *HS*. Cualquiera de los métodos utilizados varía según su aplicabilidad, mano de obra requerida, disponibilidad de laboratorio, complejidad, costos de operación, adquisición de instrumentos, observación rutinaria local, procesamiento de datos y fiabilidad del resultado (WMO, 2013).

La gravimetría es un método directo que permite medir el contenido de agua (w) y la higrometría como método indirecto permite estimar el potencial de agua (Ψ_c) del suelo (Petropoulos, 2015), el cual está en función de la humedad relativa (HR) y temperatura del suelo (T_s), como variables en la relación termodinámica de la ley de Kelvin (Meza, 2012). El w y el Ψ_c , se relacionan mediante modelos empíricos que permiten elaborar la curva de retención de humedad del suelo en campo (CRH_c), que constituye la capacidad de conservación de agua de un suelo ante distintos estados de succión y entre las funciones más utilizadas y de alta eficiencia utilizadas, está el modelo Fredlund y Xing (FX) (Alfaro, 2008; Ochoa and Patiño, 2012; Fredlund *et al.*, 2011).

Se considera que la escala de las mediciones de la *HS* es a menudo inconsistente con la escala necesaria de las estimaciones; por consiguiente, se requiere de un cambio de escala (aumento o disminución) de las mediciones a las estimaciones; por lo tanto, al comparar métodos, las propiedades estadísticas de los datos, como la varianza y la longitud de correlación, generalmente son diferentes de sus verdaderos valores, debido al sesgo en la escala de medición. Con lo cual

Western and Blöschl (1999), consideran que la varianza aparente aumenta con el aumento de la extensión, disminuye con el aumento del soporte y no cambia con el espaciado. Con lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue contrastar estadísticamente mediciones del contenido volumétrico de la humedad superficial del suelo, con estimaciones de *HS* por estimación indirecta del potencial de agua *in situ*, en unidades de muestreo en la cuenca del río Quindío (Colombia), durante siete periodos de evaluación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en la cuenca hidrográfica del río Quindío, localizada en la cordillera central de Colombia (Figura 1). Se definieron diez unidades de muestreo en la cuenca, por factores que influyen en la variabilidad de la *HS*, como son el relieve, tipo de suelo y cobertura, de acuerdo con lo que sugieren Martínez-González *et al.* (2010) y Yee *et al.* (2016).

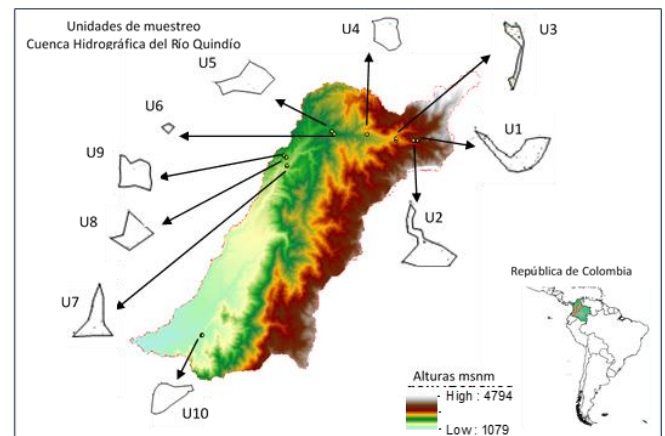


Figura 1. Diagrama representativo de las unidades de muestreo en la cuenca hidrográfica del río Quindío-Colombia. Fuente: Modelo Digital del Terreno ALOS PALSAR e IGAC-CRQ (2013).

El registro de la HR , la T_s y la toma de muestras de suelo para (w), se realizó para siete periodos o tiempos de evaluación, mediante muestreo aleatorio en 30 puntos dentro de cada unidad de muestreo como se observa en la Figura 2.

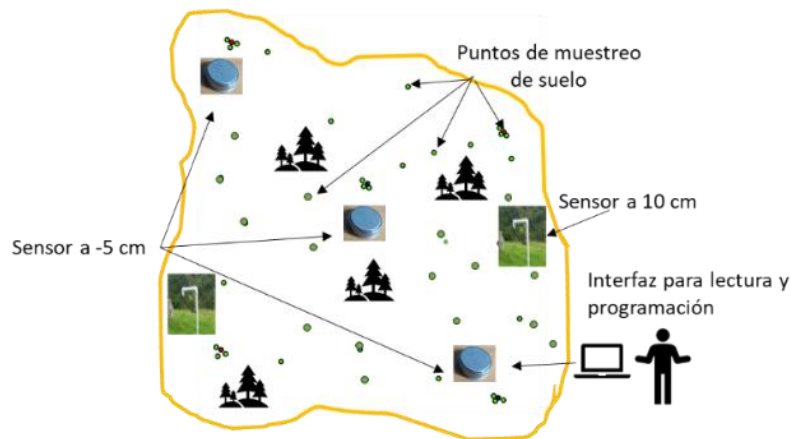


Figura 2. Modelo conceptual del sistema de monitoreo en campo en cada unidad de muestreo.

La humedad volumétrica θ_o ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), se estimó utilizando la metodología expuesta por Pla, (1983), con la siguiente ecuación: $\theta_o = w\rho$; donde w es la humedad gravimétrica (gr gr^{-1}); ρ es la densidad aparente del suelo (Mg m^{-3}). Se calculó la media heroniana θ_H de la θ_o , con la siguiente expresión $\theta_H = (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \sqrt{\prod_{i=1}^n x_i})/2$; la cual incorpora la media aritmética y la media geométrica (Sýkora, 2009).

Para estimar Ψ_c , se midió HR y T_s mediante el uso de 50 sensores iButton Hygrochron DS1923, instalados en las unidades de muestreo, a una profundidad de 0-5 cm de profundidad y a 20 cm de la superficie, programados para lecturas cada 60 minutos (calibrados previamente acorde a especificaciones del proveedor). El cálculo del Ψ_c , se obtuvo con la expresión: $\Psi_c = -\frac{R T_s}{M (\frac{1}{\rho_w})} \ln(HR)$; donde R es la constante universal de los gases; M es el peso molecular del agua; D_w , la densidad del agua. El contenido de humedad por estimación indirecta (θ_e), se realizó en función de los potenciales de agua determinados en campo, se aplicó la ecuación del modelo FX , como se expresa en la ecuación: $\theta_e = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\Psi_c/a_c)^n]^m}$ (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Donde, θ_e es la humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) a una determinada presión en campo (Ψ_c); θ_r la humedad volumétrica residual ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s , es la

humedad volumétrica a saturación ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); y, a_c es el parámetro de ajuste del modelo para la curva ($m=1-2/n$).

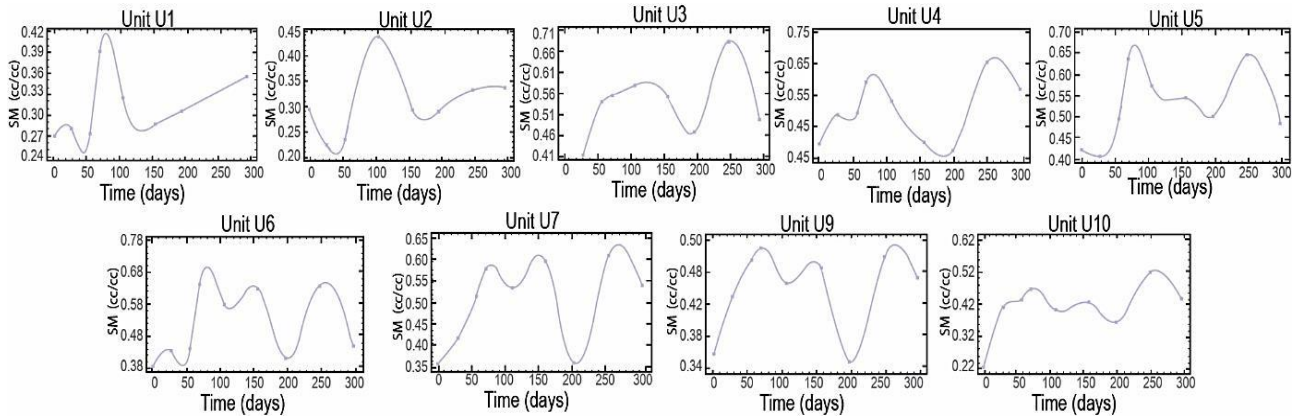
Para el análisis estadístico se agregaron 2211 estimaciones de θ_o usando el θ_H , lo que permitió generar la misma dimensión de θ_e , es decir 88 estimaciones. Se realizó un ajuste con splines cúbicos para equiparar los tiempos de muestreo y se utilizó el análisis de varianza no paramétrico longitudinal del modelo LDF1 (Ochsner et al., 2012). Se realizó un análisis de clusters, generando cinco nuevas unidades mediante el método de Ward y la distancia Euclídea. Se utilizó un dendrograma, para buscar la similitud de unidades y se validó con el estadístico Q (Wang et al., 2016). Finalmente, se realizó un diagrama de puntos bidimensional generando contornos convexos para cada nueva unidad (Van Kreveland et al., 2000) y se ajustó un modelo no lineal para predecir una modalidad a partir de la otra. Los cálculos se realizaron utilizando el programa RStudio.

RESULTADOS

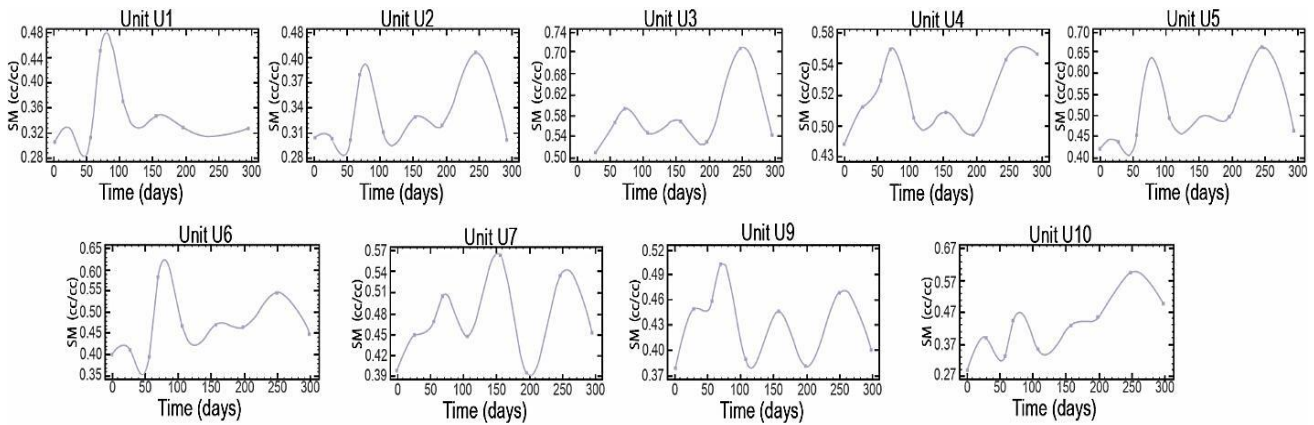
El efecto relativo al tiempo, mediante el ajuste con splines cúbicos aplicados a los valores del θ_H y a las estimaciones θ_e , para nueve unidades de muestreo se realizó para interpolar la HS en los periodos de evaluación de 28, 56, 70, 106, 155, 196 y 294 días. El análisis mostró un p-valor de 0.098 para θ_H y un p-

valor de 0.112, para los valores de θe , para 6 grados de libertad. Este análisis permitió inferir que estadísticamente no se presentó efecto relativo al

tiempo en los periodos de medición comparados, como se observa en las figuras 3a y 3b.



(a)



(b)

Figura 3. Gráficos de interpolación por splines cúbicos; (a) para el promedio heroniano y (b), para las estimaciones por el modelo FX, en cada unidad de muestreo.

El gráfico comparativo de la serie temporal, muestra humedades similares para cuatro periodos de evaluación, correspondientes a los 56 (Octubre/2017), 70 (Noviembre/2017), 156 (Febrero/2018) y 294 (Junio/2018) días, en las dos modalidades de estimación de la HS; se presenta un ligero aumento en

la humedad en los periodos de evaluación 28 (Septiembre/2017) y 196 (Marzo/2018) días y una menor HS a los 106 días (Diciembre/2017) de los valores estimados (θe) respecto de los promedios heronianos (θ_H); con p-valor de 0.098 y 0.11, por lo cual estadísticamente, se puede decir que no se presenta efecto relativo al tiempo para los promedios heronianos (θ_H) ni para los valores estimados (θe) (Figuras 4a y 4b).

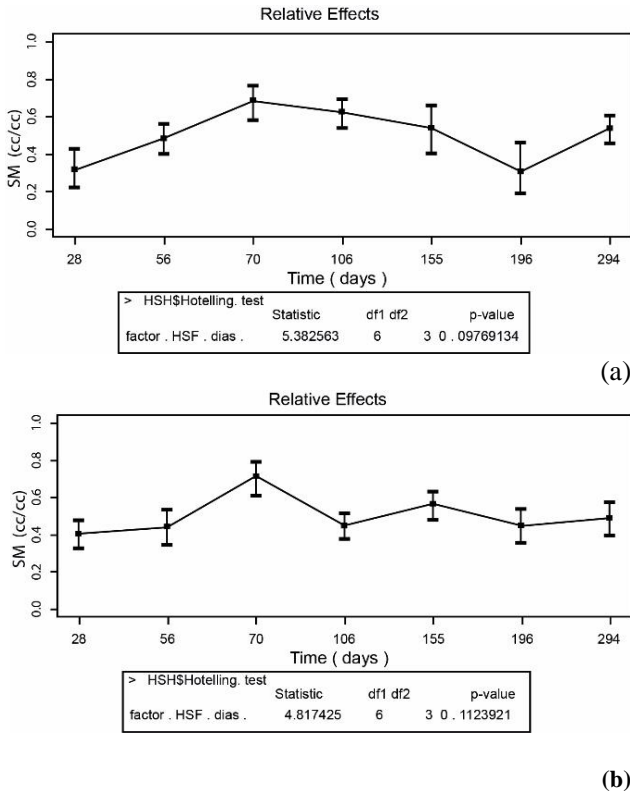


Figura 4. Efecto relativo al tiempo de evaluación para (a) la media heroniana proveniente de la humedad gravimétrica, y (b) para la humedad estimada a partir de los resultados de las CRHc.

El análisis *cluster* permitió agrupar las nueve unidades de muestreo iniciales en cinco estratos de alta similitud; en donde, el *cluster* c1 fue compuesto por las unidades de muestreo U1 y U2 en igual porcentaje de representación del 50%; el *cluster* c2 fue compuesto principalmente por las unidades U7 y U10 cada una con una representación del 40,1%; en el *cluster* c3 se incorporaron en mayor representación las unidades U4 y U5, cada una con un porcentaje del 29,99%; el *cluster* c4 fue compuesto principalmente por las unidades U6 con un porcentaje del 19,97% y con la unidad U9 con el 29,99%; y el *cluster* c5 incorporó la unidad U3 con una representación del 40,01%; como se observa en el dendrograma de la Figura 5. La validación de la conformación de los *cluster* con la prueba Q mostró un p-valor < 0.00001 para un estadístico de 0.8134, comprobándose una clara definición de los cinco *clusters* de la HS.

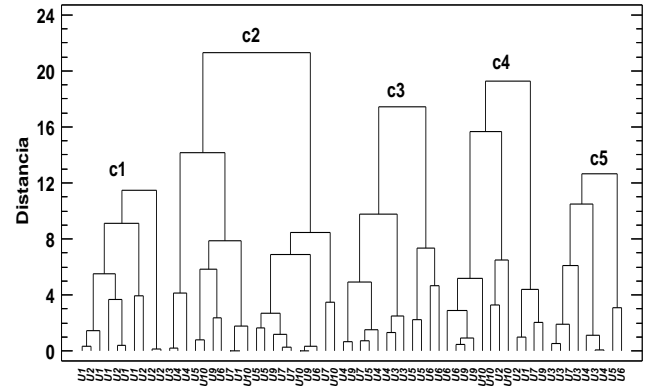


Figura 5. Dendrograma mediante el método de Ward.

En el diagrama de puntos bidimensional entre el promedio heroniano ajustado (θ_H) con la humedad estimada (θ_e) por el modelo FX con la función de contornos convexos, se observa que el *cluster* 1, el cual presenta los valores más bajos de HS estimados, entre 0,22 y 0,35 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, respecto del *cluster* 5, que presenta los mayores valores de HS, entre 0,53 y 0,64 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (Figura 6).

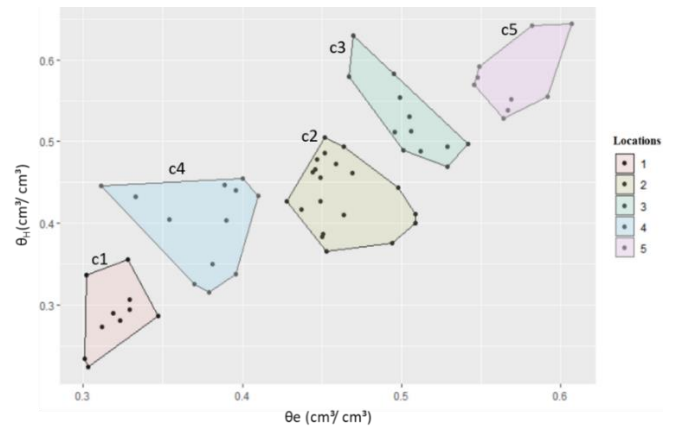


Figura 6. Diagrama de puntos bidimensional con la función de contornos convexos.

Finalmente, el modelo no lineal de mayor ajuste entre θ_H y θ_e , presentó un coeficiente de determinación de 68%. Aunque, se reconoce la inutilidad de esta medida en el contexto de los modelos no lineales (Spiess and Neumeyer, 2010), el modelo propuesto puede adoptarse para predecir el promedio heroniano (HSM) de la humedad volumétrica para estimaciones de HS

provenientes del modelo FX con parámetros de campo ($SMFX$), como se observa en la Figura 7.

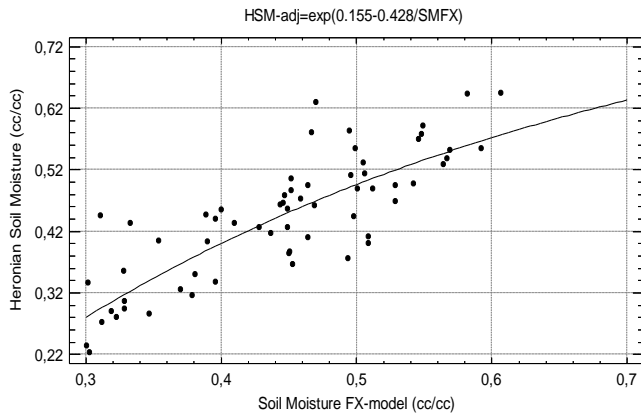


Figura 7. Modelo no lineal ajustado de la HS entre θ_H y θ_e .

DISCUSIÓN

Se obtuvieron los promedios heronianos de las estimaciones de la humedad volumétrica por periodo de evaluación como una alternativa para comparar y evaluar estadísticamente las dos mediciones de estimación de la humedad superficial del suelo en las unidades de muestreo iniciales, en que se requería agrupar la cantidad de mediciones obtenidas por método gravimétrico, para relacionarlas con un menor número de estimaciones obtenidas con modelo FX , con lo que parte de la variabilidad se suaviza cuando los promedios son considerados y el aumento del soporte aumenta la robustez de las estimaciones en el análisis como lo indican (Western & Blöschl, 1999). En este sentido, el promedio aritmético de las observaciones puede ser sensible a los valores extremos, por lo que la incorporación de la propiedad de menor sensibilidad a los extremos, como lo es la media geométrica resulta conveniente y la media aritmética promediada con la geométrica, puede resultar más robusta a observaciones que pudieran afectar las mediciones de humedad (Sýkora, 2009; Wilson et al., 2005).

Al evaluar la calidad de las estimaciones por las dos metodologías empleadas, los resultados mostraron que

no hubo efecto relativo al tiempo en las estimaciones, las variaciones fueron similares en comportamiento durante el periodo de evaluación que incluyó épocas de lluvia y periodos secos; se evidenció que la curvatura de la superficie favorece la acumulación de humedad o influye en la pérdida de agua, coincidiendo con el estudio de (Martínez-González et al., 2010), quienes reportaron coincidencia de los sitios de estudio, respecto a la humedad tanto en época de lluvia como en época seca, condición que se observó principalmente en el comportamiento de las estimaciones de la HS , por las dos metodologías en el *cluster C5*.

La representación del dendograma de la Figura 5, permitió observar que, el *cluster c1* representó el 15,87% del conjunto de conglomerados y las unidades de muestreo que conformaron este *cluster*, presentaron condiciones similares de paisaje, relieve, curvatura de la superficie, pendiente y tipo de suelo, sin embargo, se observó diferencia en la cobertura vegetal. El *cluster c2*, representó el 31,75% del conjunto de conglomerados y las unidades que conformaron este *cluster* son diferentes en condiciones de paisaje, relieve, textura del suelo y cobertura vegetal, sin embargo, son coincidentes en topografía con pendientes menores al 12%.

El *cluster c3* representó el 19,05% y las unidades de muestreo fueron similares en condiciones de paisaje, relieve y tipo de suelo, aunque presentaron diferencias en pendiente, curvatura de la superficie y cobertura vegetal. El *cluster c4*, representó el 19,05% del conjunto de conglomerados y las unidades que lo conformaron, presentaron comparativamente diferencias entre sí, en todas las condiciones de suelos y de cobertura vegetal, no obstante, estas unidades presentaron durante el tiempo del estudio una fuerte dinámica de cambio en la cobertura vegetal, tiempo en el cual se observaron en campo periodos en que la superficie del suelo estuvo expuesta sin vegetación, lo cual pudo ocasionar este comportamiento. El *cluster c5*, representó el 14,29% del conjunto de conglomerados y se conformó solamente con una tipología (U3), por lo tanto, *c5* se fue un conglomerado

particularmente homogéneo en las condiciones de suelo y cobertura vegetal.

Como lo mencionan Harold & Hocker (1984), la pendiente y la textura del suelo son las variables de mayor incidencia en la HS e influyen en los flujos de agua presentándose pérdidas por escorrentía en pendientes pronunciadas, condición que se presenta en los *cluster* C1, C3, C4 y C5 (pendientes mayores al 30%), en contraste con pendientes más suaves y superficies planas o convexas en que se desacelera el flujo por escorrentía y puede aumentar la cantidad de agua en el suelo por acumulación, como se puede relacionar en el *cluster* C2; además, la variabilidad de la HS superficial a una escala de cuenca, puede estar influenciada por factores como la precipitación, la variación de la radiación solar entrante al suelo y el viento, que pueden influir en la tasa de evapotranspiración del suelo, en aumento o disminución de la HS; y como lo propuso (Reynolds, 1970), la variabilidad de la HS superficial puede ser más grande después de un periodo de precipitación debido a los efectos de la heterogeneidad del suelo, como posiblemente puede suceder en esta cuenca.

Igualmente, el uso de la tierra y los cambios de la cobertura vegetal influyen significativamente en la variabilidad de la HS, como se observó en campo en el *cluster* C4 para un periodo de evaluación debido a estos cambios se asocian con las tasas de infiltración y escorrentía y puede evidenciarse un efecto más drástico en la temporada de crecimiento del cultivo como lo indica (Zhao et al., 2018).

Por otro lado, aunque el interés no fue realizar una comparación entre modelos, pues se reconoce la inutilidad de esta medida en el contexto de los modelos no lineales (Spiess and Neumeyer, 2010), el modelo propuesto puede adoptarse, para predecir el promedio heroniano de la humedad volumétrica, para estimaciones de HS provenientes del modelo FX, con ajustes de variables de campo.

Se considera que la estimación de la HS, por muestreo de suelo en campo es compleja debido al requerimiento de tiempo, recursos y demanda de un gran número de muestras por la variabilidad espacial del suelo (Klute, 1986; Durner & Or, 2006; Petropoulos et al., 2015; Romano, 2014); no obstante, los resultados de este estudio mostraron que se presenta relación estadística entre el promedio heroniano (que inicialmente contó con mayor número de mediciones), con las medidas del potencial de agua en campo y las estimaciones con el modelo FX (con el menor número de mediciones), aun en escenarios contrastantes de humedad para las unidades de muestreo definidas, sin que deba hacerse un modelo anidado para cada unidad.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio, muestran que estimaciones de la humedad superficial del suelo, obtenidas por estimación indirecta del potencial de agua en campo modeladas con la ecuación Fredlund-Xing y con parámetros de ajuste por textura del suelo para condiciones de campo, presentan relación estadística, con las estimaciones realizadas por método gravimétrico, por lo que puede ser considerado como una alternativa, para monitoreo de la humedad del suelo, sin que se presente el problema del efecto escala, ya que fue mantenido el mismo soporte y la misma amplitud en la tripleta que conforma la escala espacial. De este modo, el desempeño de la estimación indirecta de la HS fue consistente y se puede considerar como una alternativa que puede adoptarse para apoyar estudios de monitoreo continuo de la HS.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad del Tolima y la CRQ a través del proyecto 550116. A la Universidad de Córdoba por la comisión de estudios 004-2014.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfaro, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc 32(125), 471-481.

Durner, W., & Or, D. (2006). Soil water potential measurement. *Encyclopedia of hydrological sciences. Part 6*. doi.org/10.1002/0470848944.hsa077a.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fredlund, D. G., Sheng, D., & Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 48(2), 186-198. doi.org/10.1139/T10-060.

Kerr, Y. H., Wigneron, J. P., Al Bitar, A., Mialon, A., & Srivastava, P. K. (2016). Soil Moisture from Space: Techniques and Limitations. In *Satellite Soil Moisture Retrieval* (pp. 3-27). Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-803388-3.00001-2.

Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory methods, Methods of Soil Analysis, Part I, A. Klute, 635-660. *Am. Soc. Agron., Madison, Wisc.*

Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., & Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 89-103. versión On-line ISSN 2007-2422

Meza, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 23-38. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169524098003>.

Noguchi, K., Gel, Y. R., Brunner, E., & Konietzschke, F. (2012). nparLD: an R software package for the nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. *Journal of Statistical Software*, 50(12). <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?gs-1/9492>.

Ochsner, T., Cosh, M., Cuenca, R., Dorigo, W., Draper, C., Hagimoto, Y., Kerr, Y., Larson, K., Njoku, E., Small, E.,

Ochoa, V. E. M., & Patiño, F. H. (2012). Influencia de la succión matricial en el cambio de volumen de un suelo proveniente de un depósito aluvial del Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (64), 104-114. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43025083009>

Peng, J., & Loew, A. (2017). Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. *Water* 2017, 9(7), 530; <https://doi.org/10.3390/w9070530>.

Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 36-56. doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009

Pla, I. (1983). Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales: curso de postgrado en ciencia del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía. Alcance - Universidad Central de Venezuela (Venezuela)*. ISSN:0041-8225.

Pla, I. (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: Dificultades y errores más frecuentes. II – Propiedades hidrológicas. *Suelos Ecuatoriales* 40 (2): 94-127. <https://sites.google.com/site/suelosecuatoriales/descarga-de-articulos/volumen-40-2-en-edicion>.

Romano, N. (2014). Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *Journal of Hydrology*, 516, 6-20. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.026.

Spiess, A. N., & Neumeyer, N. (2010). An evaluation of R² as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. *BMC pharmacology*, 10(1), 6.

Sýkora, S. (2009). Mathematical means and averages: Generalized Heronian means. *Stan's Library: Castano Primo, Italy*. doi: [10.3247/SL3Math09.002](https://doi.org/10.3247/SL3Math09.002).

Tuttle, S. E., & Salvucci, G. D. (2014). A new approach for validating satellite estimates of soil moisture using large-scale precipitation: Comparing AMSR-E products. *Remote sensing of environment*, 142, 207-222. doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.002.

Van Kreveld, M., Schwarzkopf, O., de Berg, M., & Overmars, M. (2000). *Computational geometry algorithms and applications*. Springer.

Wang, J. F., Zhang, T. L., & Fu, B. J. (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 67, 250-256. doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.052.

Western, A. W., & Blöschl, G. (1999). On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of hydrology*, 217(3-4), 203-224. [doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00232-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00232-7).

WMO – World Meteorological Organization. (2013). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). Provisional 2014 Edition for CIMO-16 Approval. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/OLD-pages/Provisional2014EditionCD.html>

Yee, M. S., Walker, J. P., Monerris, A., Rüdiger, C., & Jackson, T. J. (2016). On the identification of representative in situ soil moisture monitoring stations for the validation of SMAP soil moisture products in Australia. *Journal of hydrology*, 537, 367-381. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.060.