



Ecuaciones de calibración del sensor DECAGON EC-5 para la estimación de la humedad en suelos de la Pampa Deprimida

Calibration equations of DECAGON EC-5 sensor for moisture estimation in soils of the Flooding Pampa

Fajardo González, Luisa Fernanda ^{1,2} ✉ - Entraigas, Ilda ^{1,2} - Dietrich, Sebastián ^{1,3}

Recibido: 14 de noviembre de 2020 • Aceptado: 29 de enero de 2021

Resumen

Se presentan los resultados de los experimentos llevados a cabo en laboratorio durante el proceso de calibración del sensor DECAGON EC-5 para 4 tipos de suelos representativos de la Pampa Deprimida. Se realizó el monitoreo diario de la humedad del suelo durante aproximadamente 3 meses, desde el estado de saturación hasta el secado completo. La correspondencia entre las curvas de desecación obtenidas a partir de los valores registrados por el sensor y por el método termo-gravimétrico es muy dispar según el suelo. Los modelos de regresión lineal entre las señales de salida del sensor (mV) y los contenidos volumétricos de humedad determinados en laboratorio, arrojaron coeficientes de determinación que indican un elevado grado de ajuste. La calibración del sensor DECAGON EC-5 provista de fábrica es, probadamente, adecuada para los suelos de textura franca, pero se aconseja la utilización de las ecuaciones aquí desarrolladas para el ajuste de los datos de contenido de humedad que se registren con este instrumental en los suelos de textura franco-limosa.

Palabras clave: DECAGON EC-5, curvas de calibración, Pampa Deprimida.

Abstract

Results of calibration process of DECAGON EC-5 sensor for 4 different soils that develop in the Flooding Pampa are exposed. Daily monitoring of soil moisture was carried out for approximately 3 months, from the saturation state to complete drying. The correspondence desiccation curves obtained both by sensor measurement and thermo-gravimetric method varies depending on soil type. On the other hand, linear regression models between sensor output (mV) and volumetric soil contents determined at lab, showed a high degree of adjustment. The factory-supplied calibration curve for DECAGON EC-5 sensor is proper for loamy textured soils, but it is advisable to use the equations developed here to adjust the water content data in soils with silty-loam texture.

Keywords: DECAGON EC-5, calibration equations, Flooding Pampa.

1. Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff", Av. Rep. de Italia N° 780, Azul, Bs. As, Argentina.

2. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

3. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

✉ lfajardo@ihlla.org.ar

INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es una variable clave que sintetiza la acción del clima, el suelo y la vegetación en el ciclo hidrológico (Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2004), y su medición es fundamental para la estimación de los balances de agua y energía y para la comprensión de los procesos químicos y biológicos que tienen lugar en su interior (Kizito et al., 2008). La humedad de suelo puede medirse mediante métodos directos e indirectos (Topp et al., 2008). El método directo más utilizado es el termo-gravimétrico, y consiste en la toma de una muestra de suelo que posteriormente es secada en laboratorio por técnicas de evaporación (estufa a 105 °C hasta obtener peso constante), con lo que el contenido de humedad queda determinado por la diferencia de masa entre la muestra inicial y la resultante después del proceso de secado. Los métodos indirectos, por su parte, consisten en la medición de alguna propiedad física o físico-química del suelo que sea significativamente dependiente de su contenido de agua. Dentro de ellos, en las últimas décadas se ha vuelto muy popular la técnica de capacitancia aplicada mediante sensores que, en general, son de menor costo y mayor practicidad que las restantes opciones del mercado. Un sensor de capacitancia está compuesto de electrodos, un oscilador electrónico, un frecuencímetro, y cables conectores. Los electrodos y el suelo adyacente forman un condensador cuya capacidad es función de la constante dieléctrica del suelo, que a su vez lo es de su contenido de humedad. La variación de la capacitancia puede medirse por los cambios de frecuencia de la señal electrónica a través del condensador.

La medición de humedad del suelo mediante sensores de capacitancia es sumamente ventajosa debido a que es un método que provoca mínimos disturbios, permite una lectura instantánea, no requiere mantenimiento, y admite monitoreos continuos durante largos periodos (Stacheder et al., 2009; Silva et al., 2012). Al mismo tiempo, a fin de obtener mediciones precisas, se requiere de una calibración para cada tipo de suelo debido a la gran heterogeneidad de los mismos en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Loiskandl et al., 2010). Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objetivo de la presente nota técnica es presentar los resultados de los experimentos llevados a cabo en el Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" durante el proceso de calibración del sensor DECAGON EC-5 para suelos representativos de la Pampa Deprimida.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Pampa Deprimida cubre una extensa región de la provincia de Buenos Aires (aproximadamente seis millones de hectáreas) cuya actividad principal es la cría de ganado vacuno, con más del 60 % de su superficie afectada por anegamientos permanentes, junto con exceso de sales y sodio intercambiable en sus suelos. El sector llano de la cuenca del arroyo del Azul es un área representativa de esta región, con limitaciones por condiciones de anegabilidad, alcalinidad, salinidad, muy baja permeabilidad, niveles freáticos someros y escasa profundidad de los suelos (Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989; Lavado, 1992). Los suelos considerados para el experimento fueron aquellos correspondientes a sitios donde se expresan las diferentes comunidades vegetales de la zona: 1. Estepas de halófitas (horizonte superficial muy somero, con alta concentración de sales en superficie), 2. Praderas húmedas de mesófitas (horizonte superficial poco profundo, ácidos y no salinos en superficie pero salinos y alcalinos en profundidad), 3. Praderas de mesófitas (horizonte

superficial profundo, bien drenados, ácidos y no salinos en todo el perfil), y 4. Praderas húmedas (horizonte superficial poco profundo, ácidos y no salinos en superficie, pero frecuentemente alcalinos en profundidad). Los parámetros físico-químicos de muestras representativas de los suelos utilizados en el experimento (Tabla 1) fueron obtenidos en laboratorio mediante los métodos estándares prescritos por la *Soil Science Society of America* y la *American Society of Agronomy* (1996).

Tabla 1. Características de los suelos analizados (CE: conductividad eléctrica, MO: contenido de materia orgánica, DA: densidad aparente).

Suelo	Textura	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE (µs/cm)	MO (%)	DA (g/cm ³)
1	Franco-limosa	13,9	52,9	33,3	10,2	1214,8	1,7	1,46
2	Franca	10,7	49,1	40,2	6,1	174,8	3,5	1,32
3	Franca	9,5	43,0	47,5	5,5	164,4	1,6	1,28
4	Franco-limosa	14,3	60,4	25,4	7,6	653,5	5,7	1,32

Descripción del experimento

En primer lugar, se llevó a cabo la recolección de las muestras de suelo a partir del hincado en el terreno (previamente desprovisto de los primeros 5 cm superficiales) de cilindros metálicos de 12,2 cm de altura y 9,4 cm de diámetro interno. Las mismas fueron llevadas al laboratorio donde se pesaron, y se les adosó un paño permeable en la base para evitar la pérdida de suelo y facilitar la posterior entrada de agua por capilaridad. Luego, fueron colocadas en una bandeja con agua hasta 2/3 de la altura de los cilindros, al mismo tiempo que se les agregaba agua sobre la superficie de la muestra. Después de 24 horas, las muestras se retiraron de las bandejas y fueron colocadas sobre una rejilla para eliminar el exceso de agua. Con las muestras en su punto de saturación, se hincaron los sensores en cada una de ellas a través de una ranura ubicada a 2 cm de la base del cilindro. El experimento duró aproximadamente 3 meses, a lo largo de los cuales se registró el contenido de humedad mediante el sensor DECAGON EC-5 (dichas lecturas se almacenaron en el *datalogger* Em5b) y, al mismo tiempo, se pesaron las muestras diariamente. Finalmente, una vez alcanzado el peso constante de las muestras, las mismas fueron secadas en estufa eléctrica a 105 °C para determinar su peso seco. Así, al concluir el período de registros, los diferentes valores de peso obtenidos a lo largo del experimento fueron convertidos a contenido volumétrico de humedad (teniendo en cuenta la densidad aparente y el peso seco de las muestras) a fin de tornarlos en equivalentes a los valores de humedad registrados por el sensor y proceder a la construcción de las curvas de desecación. Posteriormente se aplicó un modelo de regresión lineal a fin de obtener las ecuaciones de calibración directa, relacionando las señales de salida del sensor (expresadas en mV) con los datos de humedad obtenidos por el método termo-gravimétrico (Czarnowski et al., 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La correspondencia entre las curvas de desecación obtenidas a partir de los valores registrados por el sensor DECAGON EC-5 y por el método termo-gravimétrico es muy dispar según el suelo del que se trate. El instrumento sobreestima el contenido de humedad en el suelo 1 (diferencias de 0,12 m³/m³ de humedad para los valores mayores a 0,25 m³/m³, y de 0,19 m³/m³ en promedio para aquellos menores a dicho valor), exponiendo

una baja sensibilidad del sensor a este tipo de sustrato. Por el contrario, subestima los valores en el suelo 4 (diferencias de $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para valores superiores a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$, y adoptando una diferencia constante del orden del $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para los menores a dicho valor). Cabe señalar que para este suelo en particular no se obtuvo la desecación completa de manera natural en el laboratorio a pesar de haber extendido las observaciones hasta el día 85. Esto se debe al gran contenido inicial de agua (porosidad total cercana al 90%) y a la mayor retención producto del elevado contenido de materia orgánica (Libohova et al., 2018). En el caso del suelo 2, la respuesta del sensor es semejante a las determinaciones realizadas por el método termo-gravimétrico,

aunque con tramos de subestimación ($0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de humedad entre $0,25$ y $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y sobrestimación ($0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para los valores entre $0,25$ y $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$, y $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para los mínimos valores de la curva). En el suelo 3, el sensor copió casi fielmente la tendencia de la curva del método termo-gravimétrico, con diferencias promedio inferiores al $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de humedad para todo el espectro de variación (Figura 1). En concordancia con lo planteado por numerosos trabajos antecedentes (Kisito et al., 2008, por ejemplo), a partir de lo observado en los cuatro experimentos se comprobó la fuerte dependencia de la calidad de la respuesta obtenida con las sondas de capacitancia con respecto a la textura de los suelos.

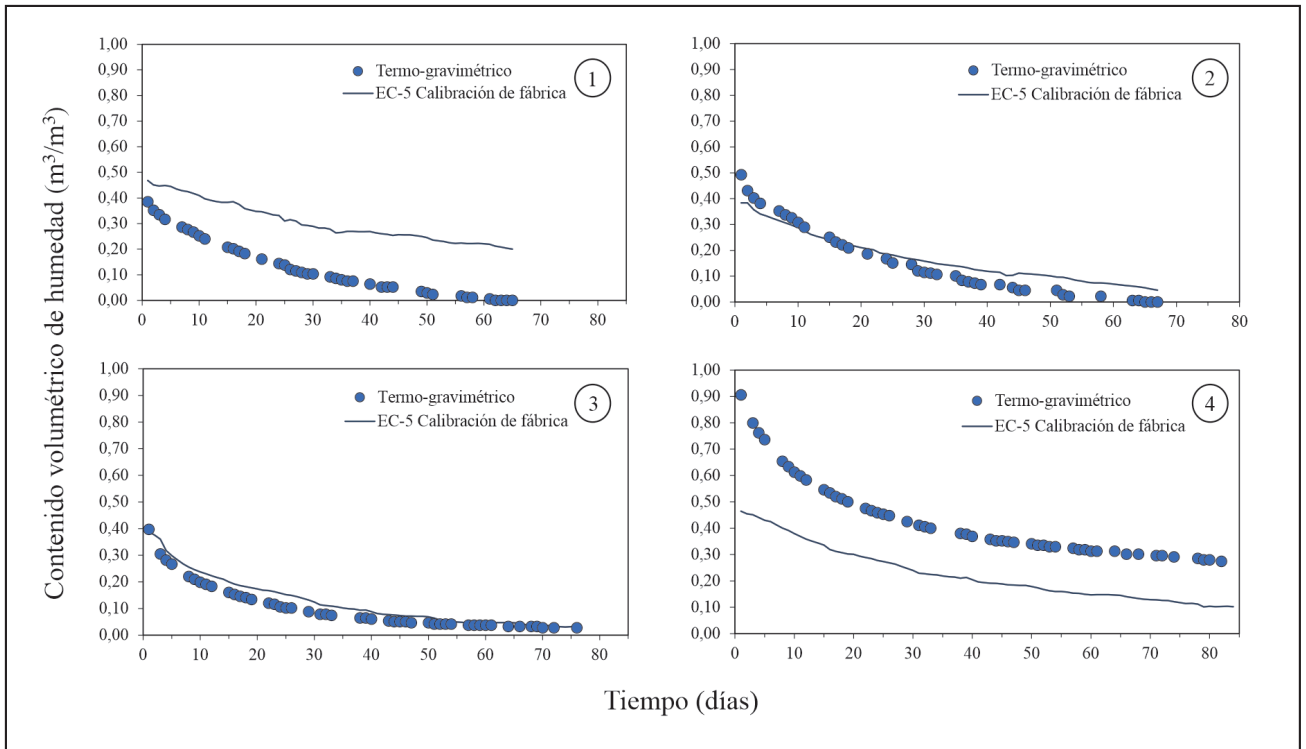


Figura 1. Curvas de desecación obtenidas para cada tipo de suelo.

Los modelos de regresión lineal entre las señales de salida del sensor (RAW) y los contenidos volumétricos de humedad determinados en laboratorio, arrojaron coeficientes de determinación que indican un elevado grado de ajuste de la recta, es decir que un gran porcentaje de la variabilidad total que presenta la humedad del suelo es contemplado por los valores “crudos” de salida del sensor (Figura 2). En la Tabla 2 se detallan los errores estimados según se contemple la calibración de fábrica del sensor o la ex-

perimental, expresados en términos de diferencias mínimas y máximas con respecto al contenido de humedad obtenido por el método termo-gravimétrico. También se adjuntan los errores cuadráticos medios (RMSE), los cuales indican que el modelo del suelo 3 es el más exacto ($0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y el del suelo 4 el menos exacto ($0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$) en la predicción de la respuesta. Asimismo se observa que la calibración experimental reduce notablemente los errores respecto a la calibración de fábrica.

Tabla 2. Ecuaciones de calibración y errores estimados (entre paréntesis se detallan los valores de humedad correspondientes expresados en m^3/m^3). RAW: salida del sensor en mV.

Suelo	Ecuación de calibración	EC-5 calibración de fábrica			EC-5 calibración experimental		
		Error Mín.	Error Máx.	RMSE	Error Mín.	Error Máx.	RMSE
1	$y = 0,0011 * \text{RAW} - 0,93$	0,08 (0,39)	0,22 (0,03)	0,18	0,02 (0,20)	0,09 (0,39)	0,04
2	$y = 0,0012 * \text{RAW} - 0,76$	0,01 (0,25)	0,11 (0,49)	0,05	0,00 (0,06)	0,04 (0,49)	0,02
3	$y = 0,0008 * \text{RAW} - 0,45$	0,00 (0,03)	0,06 (0,30)	0,03	0,00 (0,03)	0,04 (0,11)	0,03
4	$y = 0,0012 * \text{RAW} - 0,58$	0,16 (0,00)	0,44 (0,91)	0,20	0,01 (0,46)	0,20 (0,00)	0,05

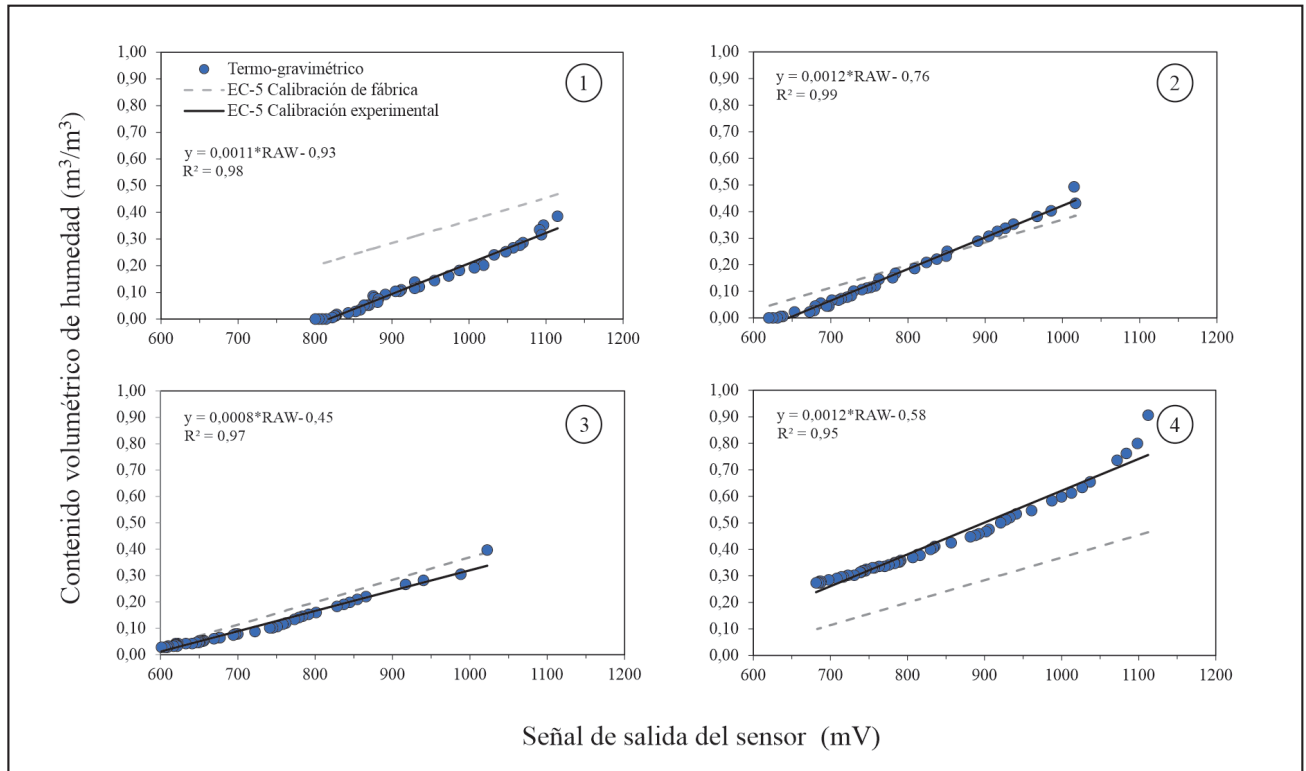


Figura 2: Curvas de calibración (de fábrica y experimental) para cada tipo de suelo.

CONCLUSIONES

La calibración del sensor DECAGON EC-5 provista de fábrica es, probadamente, adecuada para los suelos de textura franca presentes en las praderas húmedas de mesófitas y las praderas de mesófitas de la Pampa Deprimida, ya que la calibración de fábrica es muy similar al ajuste experimental obtenido. Sin embargo, para los suelos de textura franco-limosa aquí ensayados, es necesario realizar una calibración experimental. Al respecto, se brindan ecuaciones para los suelos de textura franco-limosa,

que en este caso se corresponden con ambientes de estepas de halófitas (fuertemente alcalinos) y praderas húmedas (alta porosidad y alto contenido de materia orgánica). Este aporte surge del hecho de que las sondas de capacitancia son, en principio, fuertemente dependientes de la textura y, por lo tanto, las calibraciones de fábrica responden diferencialmente a esa propiedad; pero al momento de implementar su uso es necesario considerar ciertas particularidades físicas y químicas que presentan suelos de la misma clase textural a fin de obtener una respuesta instrumental más confiable.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

CZARNOMSKI, N.M., MOORE, G.W., PYPKER, T.G., LICATA, J. Y BOND, B.J. (2005).

Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest.

Canadian Journal of Forest Research, 35(8):1867-1876.

KIZITO, F., CAMPBELL, C.S., CAMPBELL, G.S., COBOS, D.R., TEARE, B.L., CARTER, B. Y HOPMANS, J.W. (2008).

Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor.

Journal of Hydrology, 352(3-4):367-378.

LAVADO, R.S. (1992).

Río de la Plata grasslands.

Soils. En: Coupland, R.T. (ed.)

Ecosystems of the World 8A: Natural Grasslands, Elsevier: Amsterdam.

LIBOHOVA, Z., SEYBOLD, C., WYSOCKI, D., WILLS, S., SCHOENEBERGER, P., WILLIAMS, C., LINDBO, D., STOTT, D. Y OWENS, P. R. (2018).

Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database.

Journal of Soil and Water Conservation, 73(4):411-421.

- LOISKANDL, W., BUCHAN, G., SOKOL, W., NOVAK, V. Y HIMMELBAUER, M. (2010).
Calibración de sensores de agua de suelo cortos electromagnéticos.
Revista de hidrología e hidromecánica, 58(2):114-125.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I. Y PORPORATO, M. (2004).
Ecohydrology of Water - Controlled Ecosystems.
SoilMoisture and Plant Dynamics. Cambridge University Press: New York.
- SILVA, B.M., OLIVEIRA, G.C., SERAFIM, M.E., SILVA JÚNIOR, J.J., COLOMBO, A. Y LIMA, J.M. (2012).
Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro.
Pesquisa Agropecuária Brasileira, 47(2):277-286.
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C. Y MOSCATELLI, G. (1989).
Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires.
SAGyP - INTA: Buenos Aires.
- SSSA, ASA. (1996).
Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical Methods.
Soil Science Society of America Book Series N° 5. D.L. Sparks: Madison.
- STACHEDER, M., KOENIGER, F. Y SCHUHMAN, R. (2009).
New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements.
Sensors, 9(4):2951-2967.
- TOPP, G.C., DAVIS, J. L. Y ANNAN, A.P. (1980).
Electromagnetic determination of soil water content: application of TDR to field measurements.
Water Resources Research, 16(3):574-582.