

## CALIBRACIÓN A CAMPO DE SENSORES FDR. LIMITACIONES Y POTENCIALIDADES.

Schilardi, C<sup>1</sup>; Rearte, E.<sup>1</sup>; Martín, L<sup>1</sup>, Morábito, J<sup>1,2</sup>

- (1) Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo. Almirante Brown (5507), Mendoza – Argentina. E-Mail: [cschilardi@fca.uncu.edu.ar](mailto:cschilardi@fca.uncu.edu.ar)  
(2) Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino - INA

### RESUMEN

El monitoreo del contenido hídrico de los suelos es un método apropiado para optimizar el riego agrícola. En los últimos tiempos se ha incrementado el uso de sensores capacitivos; ya que ofrecen una relación práctica costo-beneficio respecto a otros dispositivos basados en la moderación de neutrones o en la reflectometría en el dominio del tiempo, que se consideran como los métodos más precisos para estimar el contenido hídrico de los suelos. El objetivo del presente estudio es la calibración a campo de un sensor capacitivo en suelos arenosos a franco-limosos. Se determinaron dos modelos de calibración, uno lineal y otro polinómico, que relacionan el contenido gravimétrico medido en muestras de humedad de suelos a campo con la excitación recibida por el sensor (mV) y con la permitividad dieléctrica medida ( $\epsilon_b$ ). Las ecuaciones de calibración fueron subsecuentemente validadas a dos profundidades en cuatro sitios de muestreos a campo. Las ecuaciones obtenidas lograron una correcta estimación del contenido hídrico de los suelos con un error de estimación de  $\pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , mejorando considerablemente la ecuación de calibración de fábrica que mostró un error de estimación promedio de  $\pm 0.097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , debido a efectos texturales, alto contenido de compactación de los suelos bajo estudio y posiblemente a efectos relacionados con los contenidos de materia orgánica. El mayor entendimiento en condiciones de campo en el uso del sensor, permitiría lograr una aplicación del agua de una manera más precisa. A futuro se recomienda realizar ensayos en distintas texturas y contenidos salinos de suelos para ver la estabilidad y sensibilidad de las ecuaciones de calibración obtenidas.

**Palabras Clave:** sensores de humedad de suelo, calibración, riego de precisión.

# CALIBRACIÓN A CAMPO DE SENSORES FDR. LIMITACIONES Y POTENCIALIDADES.

Schilardi, C<sup>1</sup>; Rearte, E.<sup>1</sup>; Martín, L<sup>1</sup>, Morábito, J<sup>1,2</sup>

- (1) Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo. Almirante Brown (5507), Mendoza – Argentina. E-Mail: [cschilardi@fca.uncu.edu.ar](mailto:cschilardi@fca.uncu.edu.ar)  
(2) Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino - INA

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo del contenido hídrico de los suelos es un método apropiado para optimizar el riego agrícola (Nolz et al, 2013). En los últimos tiempos se ha incrementado el uso de sensores capacitivos (Visconti et al, 2014); ya que ofrecen una relación práctica costo-beneficio respecto a otros dispositivos basados en la moderación de neutrones o en la reflectometría en el dominio del tiempo, que se consideran como los métodos más precisos para estimar el contenido hídrico de los suelos (Topp, 2003; Dobriyal et al, 2012). El conocimiento preciso del contenido de humedad del suelo en parcelas regadas permitiría un uso más eficiente del agua. Los sensores de humedad del suelo que proporcionan la información en tiempo real, son muy útiles para tomar decisiones de aplicación de agua de una manera más racional y adecuada (Spelman et al, 2013).

Los sensores dieléctricos estiman la permitividad dieléctrica aparente ( $\epsilon_b$ ) de un volumen de suelo, la cual depende principalmente de su contenido hídrico (Evet, 2007). El sensor 10 HS (Decagon Devices, 2012a,b), posee una ecuación de fabricación para estimar el contenido hídrico de los suelos ( $\theta$ ) a partir de la  $\epsilon_b$ , la cual se considera válida para un amplio rango o tipos de suelos (Topp et al., 1980).

Es bien conocido que la permitividad dieléctrica estimada por sensores, no sólo es determinada por el contenido hídrico de los mismos, sino también por otras propiedades de los suelos como la salinidad y textura, las cuales se denominan pérdidas dieléctricas (Topp et al., 2000). Las pérdidas dieléctricas asociadas a la salinidad de los suelos son causadas por la conductividad aparente de los suelos ( $\sigma_b$ ), las texturas arcillosas causan también pérdidas dieléctricas específicas (Hasted, 1973). Estas pérdidas dieléctricas son dependientes de la frecuencia del campo electromagnético que generan los sensores, y son particularmente importantes para sensores que trabajan a frecuencias comprendidas entre 1 a 200 MHz (Hilhorst and Dirksen, 1994), dentro de la cual trabaja el sensor 10 HS (70 MHz). Los efectos de  $\sigma_b$  en los sensores de capacitancia Decagon, han sido previamente estudiados (Kizito et al., 2008; Varble and Chávez, 2011; Kargas and Soulis, 2012; Schwartz et al., 2013).

Otros factores como la variación en el peso específico, mineralogía y contenidos de materia orgánica de los suelos, pueden causar imprecisiones en el valor del contenido volumétrico (VWC) medido por los sensores. Por lo que se recomienda la realización de una ecuación de calibración específica cuando se necesite garantizar medidas correctas (Kinzli et al., 2012). La calibración puede permitir que los errores en la medición sean reducidos a 1% expresado en VWC, (Cobos, 2010). Ya que en el uso inicial de los sensores a campo se ha observado un error del 15% del VWC respecto a medidas gravimétricas, y consecuentemente como se toman medidas discontinuas de la humedad

de suelos con los sensores, se ve la necesidad de calibrarlos para bajar considerablemente los errores de medición y así poder hacer un uso más eficiente y apropiado de la información que brindan.

La mayoría de los estudios de calibración mencionados se han ejecutado en condiciones de laboratorio (Vita et al 2006; Arriaga et al, 2011; Varble and Chávez, 2011; Hopmans et al 2008; Nolz et al, 2013) y su aplicabilidad a condiciones de campo no ha sido bien abordada, ya que hay ciertos factores que pueden influir en la medida del contenido volumétrico de los suelos como: grietas del suelo, contenidos de piedra, presencia de raíces, salinidad, fauna activa, etc. Salgado et al, 2010; muestra la calibración a campo del sensor HP II en la zona de Azul provincia de Buenos Aires, encontrando una buena calibración a campo mediante un modelo lineal.

El objetivo del presente estudio es la calibración a campo de un sensor capacitivo (10 HS, Decagon Devices, 2012 c) en suelos arenosos a franco-limosos, analizando sus limitaciones y potencialidades para su uso práctico en la toma de decisiones de riego a campo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Ocho sensores 10 HS (Decagon Devices, 2012c), fueron testeados en cuatro sitios de monitoreo en suelos arenosos a franco limosos. En cada sitio de muestreo los sensores se encontraban instalados a una profundidad de 30 cm y 60 cm, de forma tal de conocer adecuadamente el estado hídrico del suelo bajo estudio cultivado con vid. Estos sensores tienen la ventaja de medir el contenido de humedad en un gran volumen de suelo (1160 cm<sup>3</sup>; 10,5 cm \* 10,5 cm \* 10,5 cm).

En el momento de instalación de los sensores se realizó una descripción del perfil de suelos hasta el metro de profundidad, conjuntamente se tomaron muestras de suelo para caracterizar físicamente el mismo y posteriormente se calculó el peso específico del suelo en cada uno de los estratos donde se instalaron los sensores.

Para la calibración a campo se tomaron varias medidas de humedad gravimétrica en plantas vecinas a la monitoreada con sensores, en contenidos de humedad comprendidos entre capacidad de campo (Wc) y umbral de riego (Wur). En el mismo momento de la toma de humedad de suelos, se registró el contenido volumétrico de los sensores con el registrador manual Prochek (Decagon Devices, 2012c).

Se determinaron dos modelos de calibración, uno lineal y otro polinómico de tercer grado, que relacionan el contenido gravimétrico medido en muestras de humedad de suelos a campo con la excitación recibida por el sensor (mV) y con la permitividad dieléctrica medida ( $\epsilon_b$ ).

Modelo lineal (Cobos and Chambers, 2010; Kizito et al 2008):

$$\text{VWC}\% = a \cdot \text{mV} + b \quad (1)$$

Modelo Polinómico de tercer grado (Topp, 2003):

$$\text{VWC}\% = a \epsilon_b^3 + b \epsilon_b^2 + c \epsilon_b + d \quad (2)$$

El contenido volumétrico predicho de los sensores con los modelos obtenidos, se comparó estadísticamente con las medidas reales del contenido de humedad de suelos muestreadas a campo. Los análisis estadísticos comprenden el cálculo del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error cuadrático medio (RMSE) y el índice de concordancia o D-Index (Willmott et al., 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde:

RMSE: error cuadrático medio

$P_i$ : valor predicho

$O_i$ : valor observado

n: tamaño de muestra.

$$D - \text{Index} = d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=0}^n (|P_i - O_{Mi}| + |O_i - O_{Mi}|)^2} \right] \quad (4)$$

Donde:

D-Index = d: índice de concordancia

$P_i$ : valor predicho

$O_i$ : valor observado

$O_{Mi}$ : media del valor observado

El RMSE, indica el ajuste absoluto de los datos al modelo, destaca que tan cerca están los valores observados a los predichos por el modelo. El D-Index indica la precisión de la predicción comparada a una línea 1:1 (valores predichos vs valores observados).

Mientras que los valores de  $R^2$  sólo dan una indicación de la bondad de ajuste del modelo (precisión con la que los puntos de datos se encuentran en la línea de regresión ajustada). Para un buen ajuste el D-Index y  $R^2$  deben acercarse a 1, mientras que los valores más bajos de RMSE indican mejor ajuste (van Rensburg et al., 2013).

Finalmente para conocer si existen diferencias estadísticamente significativas entre los modelos de calibración analizados (lineal vs polinómico de tercer grado), se realizó la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov para RMSE.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1, detalla las principales características de los suelos en los sitios de ensayo, se describe: Estación, profundidad (cm), Volumen de sedimentación -VS (ml%g)- (Nijensohn y Maffei, 1996), textura de los suelos, peso específico aparente PEA (g%cm<sup>-3</sup>); capacidad de campo volumétrica ( $W_c$  (vwc%)), punto de marchitez volumétrico ( $W_m$  (vwc%)) y umbral de riego volumétrico ( $W_{ur}$  (vwc%)).

**Tabla 1: Detalle de los suelos en los sitios de muestreo**

Estación	Profundidad (cm)	VS (ml%g)	Textura	PEA	Wc (vwc%)	Wm (vwc%)	Wur (vwc%)
1	30	105	Franco Limoso	1.33	34.58	17.79	26.19
1	60	101	Franco Limoso	1.39	40.31	20.85	30.58
2	30	95	Franco	1.42	25.56	12.78	19.17
2	60	90	Franco Arenoso	1.36	27.20	13.60	20.40
3	30	78	Arenoso	1.60	17.60	8.80	13.20
3	60	76	Arenoso	1.52	12.16	6.08	9.12
4	30	105	Franco Limoso	1.75	35.00	17.50	26.25
4	60	102	Franco Limoso	1.32	39.60	19.80	29.70

Según la clasificación de USDA (2014), todas las zonas donde se han ubicado sensores presentan algún grado de compactación, excepto las zonas definidas por las estaciones y profundidades 2-60 y 3-60. Tal comportamiento tiene influencia en la precisión de los datos

La tabla 2 representa las diferencias iniciales observados en muestras gravimétricas de humedad de suelos, respecto a las lecturas del contenido volumétrico medido por los sensores (%VWC); se detalla: Estación, profundidad (cm), n° (número de muestras analizadas), promedio (diferencia promedio observada expresada en % VWC), Max (diferencia máxima observada expresada en % VWC) y Min (diferencia mínima observada expresada en % VWC)

**Tabla 2: Diferencias observadas a campo mediante el muestreo gravimétrico de humedad de suelos y las lecturas de los sensores.**

Estación	Profundidad	n°	Promedio	Max	Min
1	30	10	3.75	7.95	0.28
1	60	10	9.91	14.15	4.98
2	30	10	14.34	17.61	9.54
2	60	10	14.14	18.59	8.62
3	30	10	8.93	10.84	7.32
3	60	10	13.52	15.26	11.69
4	30	10	6.11	10.44	0.16
4	60	10	4.26	7.65	1.28

Los datos observados en la Tabla 2 muestran que existe una diferencia promedio de los datos gravimétricos respecto a los datos obtenidos con los sensores de un 9,73% VWC, observándose una diferencia máxima del 18.59 % VWC y una mínima del 0,16 % VWC; para un total de 80 muestras tomadas en todos los sitios de muestreo a campo. Los datos anteriormente mencionados muestran la necesidad de calibración de los sensores para aumentar su precisión.

La tabla 3 representa el ajuste del modelo lineal, en la misma se detalla: Estación, profundidad (cm), n° (número de muestras tomadas), ecuación (modelo lineal), R<sup>2</sup> (coeficiente de determinación), RMSE (error cuadrático medio), D-Index (Índice de concordancia), Dif % VWC (diferencia del valor predicho respecto al observado)

expresado en % contenido volumétrico de agua en el suelo. El promedio final está expresado en valor absoluto.

**Tabla 3: Ecuaciones de Ajuste – Modelo lineal**

Estación n	Profundidad (cm)	n°	Ecuación	R <sup>2</sup>	RMSE	D- Index	Dif. %VWC
1	30	5	VWC% = 0.1262mV - 140.34	0.86	1.13	0.95	2.12
1	60	5	VWC% = 0.1004 mV - 102.96	0.89	2.35	0.97	-1.79
2	30	6	VWC%= 0.127mV - 144.85	0.85	2.19	0.96	1.25
2	60	4	VWC% = 0.0789mV - 82.384	0.72	1.99	0.91	1.75
3	30	8	VWC% = 0.0551mV - 44.167	0.80	2.22	0.99	-1.31
3	60	7	VWC% = 0.0538mV - 48.95	0.89	1.41	0.97	-1.07
4	30	4	VWC% = 0.0875mV - 90.198	0.84	2.14	0.96	-1.77
4	60	8	VWC% = 0.1169mV - 123.84	0.89	3.8	0.97	2.61
<b>Promedio</b>				<b>0.84</b>	<b>2.15</b>	<b>0.96</b>	<b>1.71</b>

La tabla 4 representa el ajuste del modelo polinómico de tercer grado, en la misma se detalla: Estación, profundidad (cm), n° (número de muestras tomadas), ecuación (modelo polinómico), R<sup>2</sup> (coeficiente de determinación), RMSE (error cuadrático medio), D-Index (Índice de concordancia), Dif % VWC (diferencia del valor predicho respecto al observado expresado en % contenido volumétrico de agua en el suelo. El promedio final está expresado en valor absoluto.

**Tabla 4: Ecuaciones de Ajuste Modelo Polinómico de tercer grado**

Estación	Profundidad	n°	Ecuación	R <sup>2</sup>	RMSE	D-Index	Dif. %VWC
1	30	5	VWC = 0.0118 X <sup>3</sup> - 0.5867 X <sup>2</sup> + 8.4498 X	0.95	1.50	0.98	1.19
1	60	5	VWC = -0.0021 X <sup>3</sup> + 0.0942 X <sup>2</sup> + 0.2895 X	0.91	2.11	1.00	-1.90
2	30	6	VWC = -0.009 X <sup>3</sup> + 0.3917 X <sup>2</sup> + 3.2846 X	0.93	1.63	0.97	1.30
2	60	4	VWC = -0.0354 X <sup>3</sup> + 1.6083 X <sup>2</sup> - 17.133 X	0.98	1.15	0.99	-0.90
3	30	8	VWC = -0.1336 X <sup>3</sup> + 2.2016 X <sup>2</sup> - 7.3292 X	0.83	0.94	0.95	-0.65
3	60	7	VWC = -0.1054 X <sup>3</sup> + 2.1361 X <sup>2</sup> - 9.6374 X	0.98	0.64	0.99	0.42
4	30	4	VWC = 0.0092 X <sup>3</sup> - 0.5017 X <sup>2</sup> + 7.8816 X	0.98	1.13	0.99	-0.87
4	60	8	VWC = -0.0002 X <sup>3</sup> - 0.0185 X <sup>2</sup> + 1.7311 X	0.90	3.90	0.97	-2.12
<b>Promedio</b>				<b>0.93</b>	<b>1.63</b>	<b>0.98</b>	<b>1.17</b>

Los datos obtenidos en las tablas 2 y 3 muestran que el modelo que mejor representa los datos observados es el modelo polinómico, sin embargo no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos modelos analizados. Como surge de los resultados encontrados de la Prueba de Kolmogorov-Smirnov para RMSE:

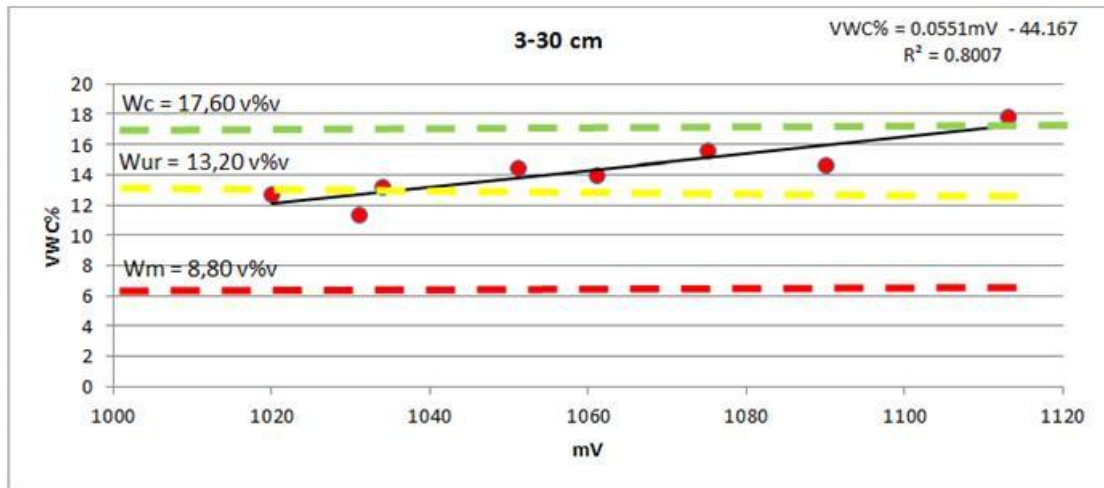
Estadístico DN estimado = 0.527778

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1.08616

Valor P aproximado = 0.189019

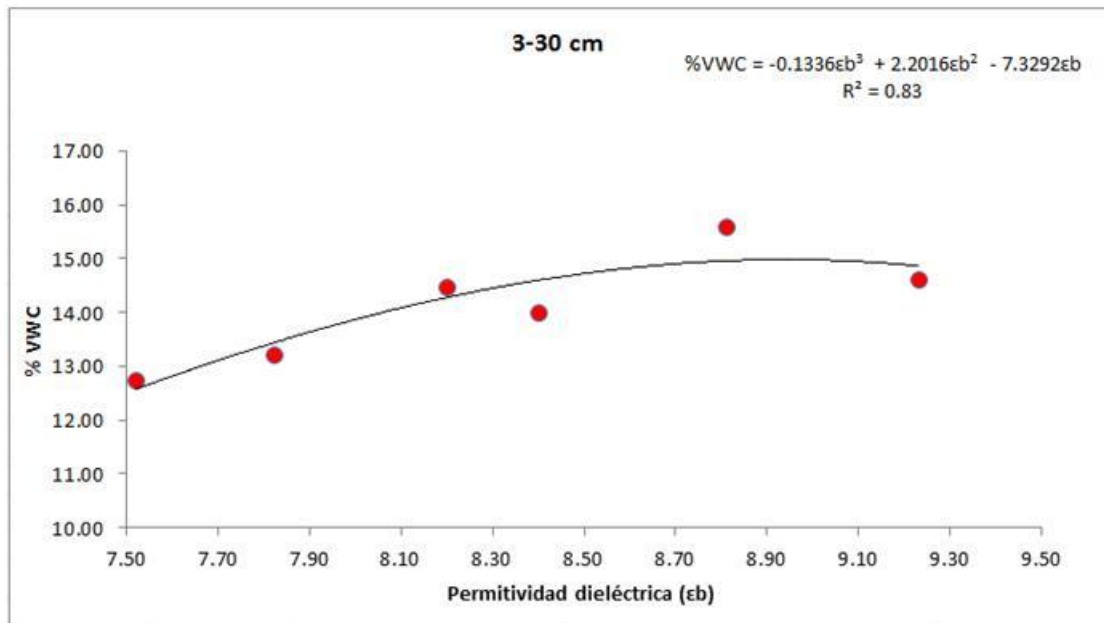
La figura 1 presenta el ajuste del modelo lineal para la estación 3 a 30 cm de profundidad. La línea verde indica el contenido volumétrico de agua del suelo a

capacidad de campo ( $W_c$ ), la línea roja el contenido volumétrico de agua del suelo en punto de marchitamiento permanente ( $W_m$ ) y la línea amarilla el contenido volumétrico de agua del suelo en el umbral del riego ( $W_{ur}$ ). Se observan los 8 puntos de muestreo comprendidos mayoritariamente entre  $W_c$  y  $W_{ur}$ .



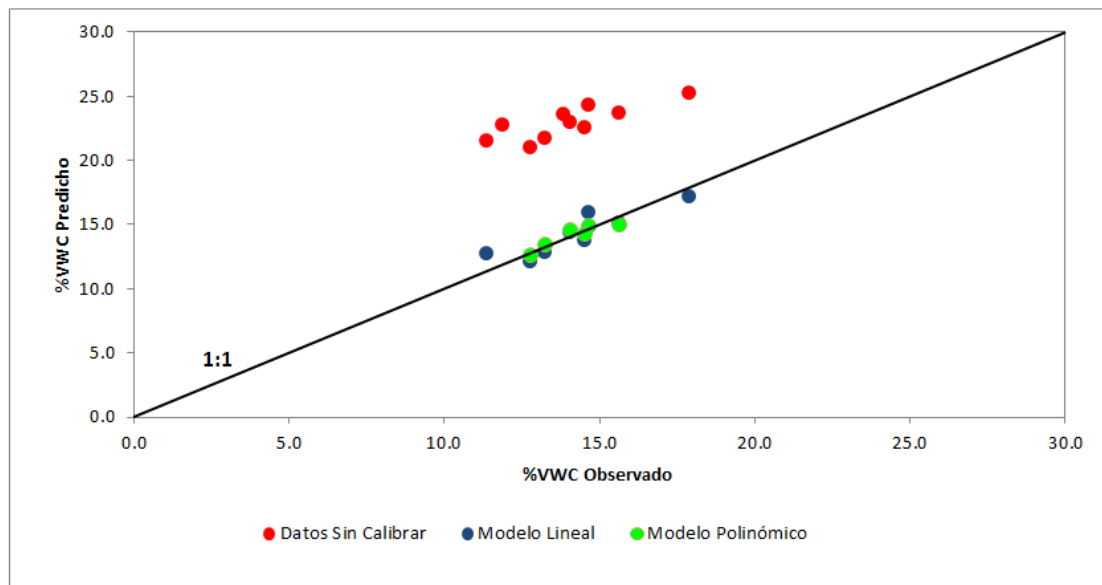
**Figura 1: Ejemplo de ajuste del modelo lineal**

La figura 2 ilustra la misma situación descrita anteriormente pero en este caso con ajuste del modelo polinómico de tercer grado.



**Figura 2: Ejemplo de ajuste del modelo polinómico de tercer grado**

La figura 3 muestra la relación entre los valores estimados por los modelos respecto a los valores medidos de la humedad de suelos a campo mediante muestreo gravimétrico. Puede observarse que para los sensores sin calibrar del ejemplo 3-30 cm (ídem figura 1 y 2), la calibración de fábrica de los sensores sobreestima el contenido hídrico de los suelos y la diferencia obtenida entre los modelos de calibración lineal y polinómico de tercer grado es mínima.



**Figura 3: Relación entre valores predichos (modelos) vs valores reales (muestras gravimétricas).**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se calibraron a campo 8 sensores capacitivos 10 HS (Decagon Devices), mediante dos modelos de calibración, uno lineal y otro polinómico, que relacionan el contenido gravimétrico medido en muestras de humedad de suelos a campo con la excitación recibida por el sensor (mV) y con la permitividad dieléctrica medida ( $\epsilon_b$ ). Las ecuaciones de calibración fueron subsecuentemente validadas a dos profundidades en cuatro sitios de muestreo a campo. Las ecuaciones obtenidas lograron una correcta estimación del contenido hídrico de los suelos con un error de estimación de  $\pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (2% VWC), valores similares obtuvieron: Mittelbach et al, 2012; Chávez y Varble 2011; Van Rensburg, et al 2013; Soulis et al, 2015 y Visconti et al, 2014. Se mejoró considerablemente la ecuación de calibración de fábrica que mostró un error de estimación promedio de  $\pm 0.097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (9,7% VWC), debido a efectos texturales, de compactación de los suelos bajo estudio y posiblemente a efectos relacionados con los contenidos de materia orgánica. Se sugiere la utilización del modelo lineal por ser más sencillo y práctico, ya que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los dos modelos analizados. Se consideró adecuada la técnica de calibración a campo cuyas ventajas redundan en considerar todos los factores que pueden tener influencia en el funcionamiento de los sensores in situ; como grietas del suelo, contenidos de piedra, presencia de raíces, salinidad, fauna activa, etc., similares conclusiones mencionan Chávez y Varble 2011. Su principal limitación es el tiempo que demora la calibración total que implica la obtención de la ecuación de cada punto de análisis, que puede demorar entre uno a tres meses según el manejo del riego y suelo en la zona de estudio.

Las condiciones de suelo donde va localizado cada sensor indican la necesidad de calibrarlos individualmente, similares conclusiones mencionan Chávez y Varble 2011 y Van Rensburg, et al 2013. Por lo tanto la calibración obtenida, es específica de cada sensor estudiado, debido principalmente a la variabilidad observada de los pesos específicos aparentes en cada zona de muestreo analizada. Su utilización queda supeditada al rango de humedad con la cual se obtuvo cada modelo de calibración, como así también hay que destacar que los modelos tienen un valor máximo, que es



coincidente con el estado de saturación de los suelos. En las conclusiones obtenidas no se ha analizado el efecto de histéresis que puedan presentar los sensores, ya que se ha seguido el ciclo de mojado y secado, tal cual como ocurre en el campo cada vez que se riega. Sería recomendable a futuro realizar el análisis de materia orgánica, salinidad y textura por fracciones granulométricas de cada punto de muestreo para el mejor entendimiento de los resultados obtenidos.

La necesidad de calibración específica de los sensores debe utilizarse cuando se necesita conocer con precisión el balance hídrico de un suelo con fines de investigación. Para tal situación se propone una técnica de calibración intermedia, que consiste en la extracción de porciones inalteradas de suelos con cilindros de aluminio de tamaño mayor al volumen de acción del sensor, para luego realizar la calibración en laboratorio. Esta técnica propuesta tiene la ventaja de conservar la estructura original de suelo en laboratorio y permitiría un ahorro de tiempo considerable en la calibración de los sensores. En el caso de contar con un monitoreo continuo de la humedad del suelo y/o tener la necesidad de gestionar el riego en una fina comercial, sería más recomendable gastar los esfuerzos en determinar y corroborar la capacidad de campo y punto óptimo de riego con la misma información que brindan los sensores, trabajando posteriormente para la toma de decisiones del riego, con valores cuasi-relativos del sensor.

Actualmente los autores están calibrando y probando a campo nuevos sensores desarrollados para situaciones particulares: a) más robustos, más durables y con mayor capacidad de ser trasladados a distintos puntos de medición, b) otros para el caso de suelos con gran contenido de piedras, como así también presencia de burbujas de aire y c) aquellos que además de medir la humedad del suelo registran la conductividad eléctrica y temperatura de mismo.

El mayor entendimiento en el uso del sensor en condiciones de campo, permitiría lograr una aplicación del agua de una manera más precisa. Independientemente si para las condiciones de manejo de los sensores es necesitara la calibración específica, aún es mucho más importante para el manejo práctico de los datos que brinda el sensor, asegurar un adecuado lugar de ubicación del mismo y más aún su correcta instalación a campo, ya que si estas consideraciones no son adecuadas pueden generar errores más grandes al error que pueda tener la ecuación de calibración de fábrica del sensor. A futuro se recomienda realizar ensayos en distintas texturas y contenidos salinos de suelos para ver la estabilidad y sensibilidad de las ecuaciones de calibración obtenidas en los suelos de la región.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Arriaga, J.; Vanderlinden, K.; Muriel, J.L.; Moron, M.; Ortega, M.G.; Rubio, F.R.; 2011. Calibración de Sensores de humedad capacitivos usando redes neuronales. Jornadas de Investigación en Zona no Saturada, Octubre 2011, Salamanca, España.

Chávez, J.L.; Varble, J.L., 2011. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in Eastern Colorado. *Agricultural Water Management* 101 (2011) 93– 106.

Cobos, D., and Chambers, C., 2010. “Calibrating ECH2O soil moisture sensors.” Application Note 13393-04, Decagon Devices, Pullman, WA.

DecagonDevices, 2012a. 10HS Operator's Manual. Version 3. DecagonDevices, Inc., Pullman, WA, Available online at: <http://www.decagon.com/assets/Manuals/10HS-Manual.pdf> (verified 10 April 2012).

DecagonDevices, 2012b. 5TE Operator's Manual. Version 7. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, Available online at: <http://www.decagon.com/assets/Uploads/13509-07-Printing.pdf> (verified 10 April 2012).

Decagon Devices, 2012c. EC-5 Soil Moisture Sensor User's Manual. Version 2. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, Available online at: <http://www.decagon.com/education/ec-5-manual/> (verified 12 July 2013).

Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., Hussain, S.A., 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology* 458–459, 110–117.

Evett, S.R., 2007. Soil water and monitoring technology. In: Stewart, B.A., Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 25–84.

Hasted, J.B., 1973. *Aqueous Dielectrics*. John Wiley & Sons, New York.

Hilhorst, M.A., Dirksen, C., 1994. Dielectric water content sensors: time domain versus frequency domain. In: *Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*. United States Department of Interior Bureau of Mines, Evanston, Illinois.

Hopmans, J.W.; Kizito, F.; Campbell, C.S.; Campbell, G.S.; Cobos, D.R.; Teare, B.L.; Carter, B., 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology* (2008) 352, 367–378

Kargas, G., Soulis, K.X., 2012. Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 138, 632–641.

Kinzli, K., Manana, N., and Oad, R. (2012). "A comparison of laboratory and field calibration of a soil moisture capacitance probe for various soils." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138(4), 310–321.

Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B., Hopmans, J.W., 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology* 352, 367–378.

Nijensohn, L y Maffei J.A, 1996. Estimación de la salinidad y otras características edáficas a través de los volúmenes de sedimentación. *Ciencias del Suelo*. 14: 119-121 – 1996.

Nolz, R.; Kammerer, G.; Cepuder, P, 2013. Calibrating soil water potential sensors integrated into a Wireless monitoring network. *Agricultural Water Management* 116 (2013) 12– 20.

Mittelbach, Heidi; Lehner, Irene; Seneviratne, Sonia I., 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology* 430–431 (2012) 39–49.

Salgado, H.; Romay, C.; Zabala, S.M. y Génova, L., 2012. Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. VI Jornadas de Riego y Fertilización. 7 al 9 de noviembre de 2012, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

Schwartz, R.C., Casanova, J.J., Pelletier, M.G., Evett, S.R., Baumhardt, R.L., 2013. Soil permittivity response to bulk electrical conductivity for selected soil water sensors. *Vadose Zone Journal* 12, <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2012.0133>.

Soulis, Konstantinos X.; Elmaloglou, Stamatios; Dercas, Nicholas, 2015. Investigating the effects of soil moisture sensor positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management* 148 (2015) 258–268.

Spelman, D; Kinzli KD; and Tanya Kunberger T, 2013. Calibration of the 10HS Soil Moisture Sensor for Southwest Florida Agricultural Soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 139, No. 12, December 1, 2013. © ASCE, ISSN 0733-9437/2013/12-965-971.

Topp, G.C., 2003. State of the art of measuring soil water content. *Hydrological Processes* 17, 2993–2996.

Topp, G.C., Zegelin, S., White, I., 2000. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on Time Domain Reflectometry measurements in soils. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1244–1252.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574–582.

USDA, 2014. *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual*. Pag 487.

Van Rensburg, LD; Van der Westhuizen RJ, 2013. Rapid procedure to calibrate EC-10 and EC-20 capacitance sensors in soil. ISSN 0378-4738 (Print) = *Water SA* Vol. 39 No. 5 October 2013. ISSN 1816-7950 (On-line) = *Water SA* Vol. 39 No. 5 October 2013.

Varble, J.L., Chávez, J.L., 2011. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management* 101, 93–106.

Visconti, F; De Paz, JM, Martínez, D; Molina, MJ, 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE

forestimatingthewatercontent of irrigatedsoils. Agriculturalater Management 132 (2014) 111– 119.

Vita Serman, F., C. Schugurensky, R. Carrión, S. Rodríguez; 2006. Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo tipo FDR de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo. III Jornadas de Riego y Fertirriego. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. 10 y 11 de agosto de 2016, Mendoza, Argentina.

Willmott, Cort J.; Robeson, Scott M.; and Matsuura Kenji; 2012. Short Communication A refined index of model performance. International Journal of Climatology. Int. J. Climatol. 32: 2088–2094 (2012).