

**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA**

**PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA
APTA PARA EL CONSUMO HUMANO**

**MONITOREO DE HUMEDADES Y NIVELES FREÁTICOS PARA ADOPCIÓN
DE POLÍTICAS DE MANEJO LOCALES EN LA CIUDAD DE CÓRDOBA.**

**Reyna, Teresa; Reyna, Santiago; Lábaque, María; Riha, César; Linares, Jorge; Fiad,
Guillermo; Reyna, Estela; Frateschi, Adolfo**

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C.
Av. Vélez Sarsfield 1611. Te: 0351-4692737. teresamaria.reyna@gmail.com.

RESUMEN:

El monitoreo de humedades en el subsuelo de urbanizaciones residenciales que disponen de sistema de riego superficial mediante sistema presurizado de aspersión, permite ajustar en forma continua los ciclos de riego con el objeto de reducir la necesidad de extracción de agua de subsuelo para el riego. En el caso de la urbanización Cañuelas, este sistema presenta, adicionalmente, el objeto de detectar cualquier tipo de anomalía en el contenido de humedad del subsuelo producido por la pérdida en el conducto de la empresa Aguas Cordobesas que vincula la planta de tratamiento Los Molinos con la Estación Elevadora Sur y que atraviesa los espacios verdes del emprendimiento. En este trabajo se describe el proyecto de diseño del sistema de monitoreo de humedades subsuperficiales en distintos puntos de los espacios verdes como también el registro de precipitaciones y fluctuación en el nivel freático de la urbanización ubicado en el sector sur de la ciudad de Córdoba en la provincia de Córdoba (Argentina). Para asegurar la optimización del sistema de monitoreo, cada unidad de sensores dispone de sistemas automáticos de recolección de datos (data logger) y personal capacitado que recoge la información mensualmente emitiendo un informe con conclusiones.

ABSTRACT:

Moisture monitoring, in the underground of residential developments that have surface irrigation system using pressurized sprinklers, is an excellent way to adjust watering cycles in order to reduce the need for extraction of underground irrigation water. In the case of Cañuelas urbanization, this system has, additionally, the object of detect any anomaly in the subsurface moisture content produced by a loss of the pipe that links Los Molinos treatment plant with South Lift Station which passes through the green spaces of the residential area.

In this paper it is described the system designed to monitor subsurface moisture in different parts of the green spaces as well as record rainfall and water table fluctuation in the urbanization located in the south of the city of Cordoba (Argentina). In order to optimize the monitoring system performance, each sensor unit collects data automatically (data logger) and this information is then analyzed and processed by trained staff.

Key words: moisture monitoring, water table fluctuation, unsaturated soils.

INTRODUCCIÓN

La urbanización Cañuelas se encuentra ubicada en el sector Sur de la ciudad de Córdoba, accediendo al mismo a través del camino a San Carlos a una distancia de unos 650 metros con el cruce de la Av. Circunvalación. El predio presenta un total de 355 lotes con superficies individuales del orden de los 1500 m², con amplios espacios verdes y una cancha de golf de 9 hoyos en su interior.

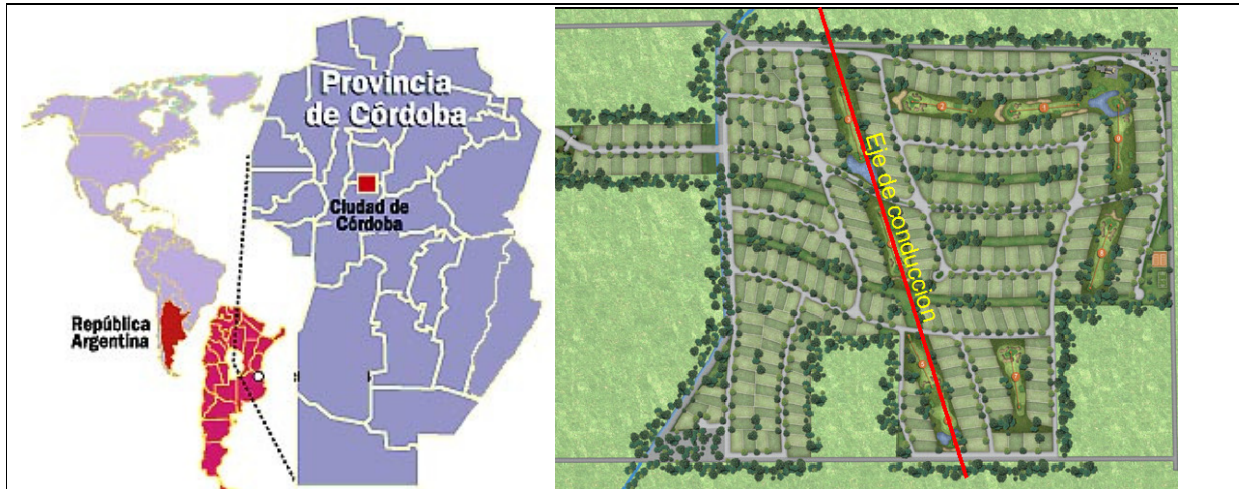


Figura 1. Ubicación de Córdoba y de la urbanización Cañuelas

Como se observa en la figura anterior, el loteo “Cañuelas”, es atravesado por una conducción de 1600 mm en sentido Nor-Oeste a Sur-Este que abastece de agua potable al sector sur de la ciudad de Córdoba, la misma es operada por la empresa Aguas Cordobesas S.A. y vincula la planta potabilizadora Los Molinos con la Estación Elevadora Sur.

La presencia de este caño fue considerada entre las premisas de diseño del trazado urbanístico, destinándose a espacio verde y uso recreativo una franja de 50 m de ancho promedio. Sobre la traza del caño, se emplaza el campo de golf de 9 hoyos que conforma parte de la superficie de espacios verdes de la urbanización, ubicándose sobre la traza del caño las zonas donde se ubican los hoyos N°3 y N°4.

Con el objeto de detectar pérdidas tempranas tanto en la conducción como en las lagunas, se firmó un convenio entre la urbanización y la empresa Aguas Cordobesas para la instalación de sensores que permitan identificar anomalías en los contenidos de humedad natural del suelo.

En este documento se resumen los trabajos previos y resultados del monitoreo descrito, el cual es realizado hasta el día de la fecha por profesionales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN – Urbanizaciones Residenciales 2011).

ENSAYOS DE CAMPO

Según lo expresado por Robinson et al. (2008) quienes revisaron recientemente los métodos disponibles para medir la humedad del suelo en aplicaciones ecológicas e hidrológicas a escala de cuenca, la medición en continuo con redes de sensores puede cubrir escalas espacio-temporales intermedias que ningún otro método puede abarcar.

Se planteó entonces, la necesidad de realizar mediciones de humedad en el predio para el monitoreo. Para ello se procedió a monitorear mediante sensores de humedad la respuesta del suelo ante la ocurrencia de eventos de precipitación y de riego.

La cubierta vegetal de los espacios verdes en general es césped gramillón, el cual es cortado quincenalmente para mantener su altura entre 1,5 y 4 cm.

EQUIPAMIENTO INSTALADO

Con el objeto de realizar el monitoreo descrito anteriormente, se colocaron sobre la traza de la conducción y en su entorno una serie de equipos, los cuales se agruparon de la siguiente manera:

Tres Sensores ECH2O de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica (5-TE) del Suelo. Rango 0-100% humedad volumétrica. Longitud parte sensor 5 cm.

Cuatro Sensores ECH2O de Humedad de Suelo (EC-5). Rango 0-100% humedad volumétrica. Longitud parte sensor 5 cm.

Tres Sensores ECH2O de Humedad de Suelo (10 HS). Rango 0-100% humedad volumétrica. Longitud parte sensor 10 cm.

Pluviómetro marca Decagon modelo ECRN-50, resolución 1 mm, tipo de sensor de cuchara simple, salida plug stereo, material de carcasa ABS, temperatura óptima de trabajo 0° a 60°C, tamaño 5 cm x 10 cm, compatible con datalogger Em 50, y otros.

Sensor de temperatura del aire marca Decagon (www.decagon.com), modelo ECT, precisión entre 5° y 40°C de temperatura de trabajo: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, fuera de este rango la precisión es de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$

Un sensor Micro- Diver para monitoreo de niveles de aguas subterránea. Diámetro de 18 mm y 88 mm de longitud. El rango de precisión de la lectura para una profundidad entre 20- 50 metros de la presión es de $\pm 2,0$ cm de columna de agua (cmH_2O) con una resolución de 0.4 cmH_2O .

Este instrumental se encuentra agrupado básicamente en cuatro sectores denominados unidades (Tabla 1) y dispuestos a distintas profundidades (Tabla 2), los mismos fueron debidamente seleccionados con el objeto de obtener valores representativos de cada una de las variables monitoreadas.

Con el fin de disponer de un panorama claro, se presenta a continuación una planimetría general de la urbanización con la indicación de las unidades de monitoreo existentes y las coordenadas de los mismos.

Para ubicar las unidades de medición fue necesario replantear el conducto de aguas cordobesas para ello se utilizó un nivel y una mira como herramienta topográfica, y se tomaron como puntos de referencias las cámaras de limpieza y las de válvulas de aire.



Figura 2. Nivel utilizado para alinear la cañería. Der: Cámara de limpieza de cañería de Aguas Cordobesas

Seguidamente se excavó hasta encontrar el caño de aguas cordobesas, luego se incorporaron los sensores de humedad, uno en el pozo de exploración por encima del extradós del caño sobre una tapada de 60 cm. de suelo. El pozo se excavó unos 3,30 m de profundidad desde el nivel del suelo hasta el extradós del caño.



Figura 3. Ubicación de los sistemas de monitoreo (Google Earth)

Tabla 1: Coordenadas Espaciales para las tres unidades de medición de humedad.

Unidad	Latitud	Longitud
1	31°28'32,30"S	64° 9'23,70"O
2	31°28'34,80"S	64° 9'22,54"O
3	31°28'44,08"S	64° 9'20,97"O
4	31°28'23,71" S	64°9'05,30"O

Tabla 2: Profundidad de instalación de los sensores para las tres unidades de medición (m).

Unidad	Sensor EC-5	Sensor 10 HS	Sensor 5-TE	Sensor EC-5b
1	2,70	1	0.30	0.30
2	1,80	1	0.30	
3	2	1	0.30	

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE SENSORES

En relación a los sensores de capacitancia se debe indicar que todos los sensores de capacitancia instalados en suelos, aun con características similares, deben ser calibrados con el objetivo de mejorar su precisión dado la influencia en la medida de otros factores independientes al contenido de humedad como por ejemplo la variabilidad del pH o la conductividad eléctrica dentro de la matriz porosa.

Para mejorar la determinación de las lecturas y de acuerdo a las publicaciones actualizadas sobre el instrumental a utilizar, se han realizado en laboratorio una serie de tareas previas de calibración de los sensores. Esta calibración permite encontrar una ecuación que ajuste a los valores de humedad en todo el rango de medición de cada sensor (EC-5, 10 HS y 5-TE) de acuerdo al tipo de suelo.

Para los trabajos mencionados, fue necesario realizar extracciones de suelo puntualmente a las profundidades de instalación de los sensores (0,30; 1,00; 2,80 m). Con un barreno se perforó hasta alcanzar las profundidades anteriormente mencionada, obteniendo una cantidad de suelo de 4Kg por unidad de monitoreo, que se empaquetaron en bolsas debidamente rotuladas (Figura 4).



Figura 4. Perforación y obtención de la muestra

Posteriormente se realizó un tamizado de cada bolsa y se aplicó la técnica de cuarteo para cumplir con las condiciones estadísticas de muestreo, luego cada una de las muestras se colocaron recipientes plásticos con una altura de 13 cm, diámetro de 15 cm, los cuales se etiquetaron, instalándose los respectivos sensores. Seguidamente las probetas fueron colocadas sobre una bandeja de mayor tamaño y con una profundidad de 5 cm lleno de agua, permitiendo así el humedecimiento del suelo por el efecto de capilaridad conjuntamente con un riego superficial. La exposición en el recipiente con agua fue aproximadamente de un día o hasta que el nivel del agua del recipiente se estabilizó.

Finalizada la tarea anterior se colocaron las probetas sobre una mesa del laboratorio, pesándolas diariamente y obteniendo en correspondencia una muestra de suelo para determinar su humedad y a la vez se registraron las lecturas de los sensores colocados en unidades RAW.

Las muestras de suelo extraídas diariamente fueron colocadas en un horno a 105° C durante 24 horas determinándose su humedad gravimétrica, que conjuntamente con los valores de las lecturas de los sensores permitieron ajustar la curva de calibración de cada una de las unidades de medición (Figura 5).



Figura 5. Izq. Equipo utilizado para la calibración de los sensores: Horno eléctrico, recipientes de plástico, tamices y proctor. Der. Balanza con precisión de 0,5 gramos

Con el fin de caracterizar el suelo del lugar, se tomó una muestra de 600 gramos de suelo seco extraída del terreno a una profundidad de 1 metro y aplicando la técnica de granulometría en seco se pasó por los tamices N°4, N°10, N°40, N°100 y N°200. Seguidamente se tomaron los pesos retenidos en cada tamiz, obteniéndose la siguiente curva granulométrica que se observa en la figura 6 (Linares, 2012).

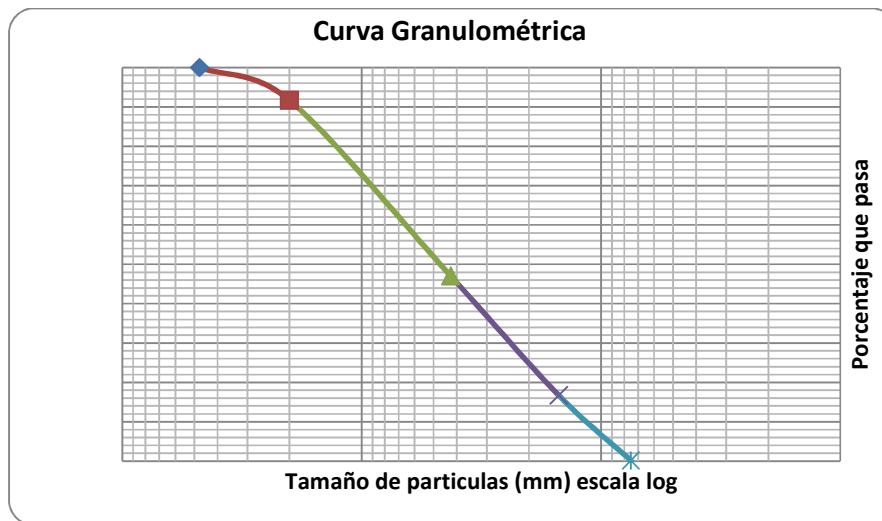


Figura 6. Curva granulométrica de suelo natural del sector de estudio

De la curva anterior se obtuvieron los valores de los diámetros d_{84} , d_{60} , d_{50} , d_{30} y d_{10} tal como se muestra en la Tabla 3. Estos valores resultan necesarios para determinar los coeficientes de uniformidad y curvatura, definiendo los mismos a la muestra como sedimento fino.

Tabla 3: Valores de diámetros de la muestra

	Diámetros del Sed. Fino (mm)
d_{84}	1,50
d_{60}	0,67
d_{50}	0,47
d_{30}	0,24
d_{16}	0,15
d_{10}	0,11

Con los diámetros obtenidos, se calculó el coeficiente de curvatura (C_c) y de uniformidad (C_u) (Hazen, 1892) aplicando las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [1]$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} * d_{10}} \quad [2]$$

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%, Si C_u es menor que 5, el suelo tiene una granulometría uniforme.

Si $5 < C_u < 20$, el suelo es poco uniforme; y si $C_u > 20$, se considera bien graduado. Cuanto más uniforme es el suelo, más uniforme es el tamaño de los poros. (Terzaghi y Peck, 1948).

Cuando el coeficiente de curvatura tiene valores entre 1 y 3 se considera que el suelo es bien graduado.

De los valores obtenidos anteriormente, se puede indicar que el suelo del lugar resulta homogéneo y bien graduado.

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Tal como se mencionó anteriormente, los sensores de humedad fueron ubicados en tres recipientes, cada uno de ellos con suelo correspondiente a cada una de las profundidades donde se ubicaron los sensores en el terreno.

Con los valores de medición de los sensores en unidades RAW y las humedades asociadas a las mismas determinadas en el laboratorio, se realizó un gráfico para cada sensor, efectuándose posteriormente la curva de ajuste de los mismos (tipo 5-TE, 10 HS y EC-5)

Para el sensor EC-5 el máximo valor de medición de RAW es de 1100 y el mínimo de 600 RAW, en el sensor 10-HS el máximo valor es de 1400 y el mínimo de 800 y en el sensor 5-TE el máximo valor es de 1300 y el mínimo de 250.

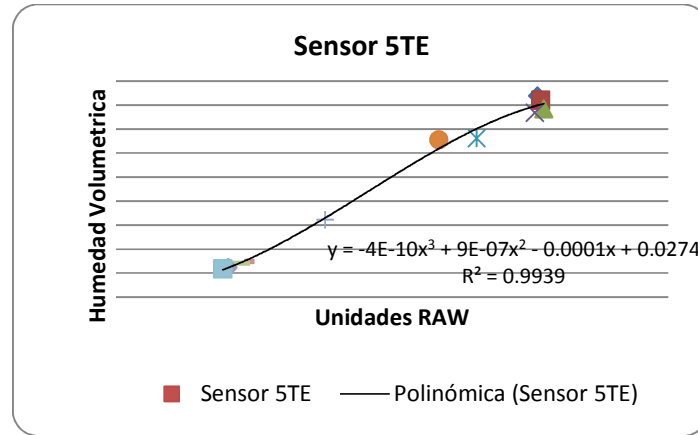


Figura 7. Curva de calibración del sensor 5-TE

Como se observa en la figura 7 para este tipo de suelo la curva del sensor 5-TE se ajusta en un rango de humedad residual de 0,058 para 290 RAW y un valor máximo de contenido de humedad saturada de 0,41 para 1145 RAW. Se determinó que la mejor curva que se ajusta a los valores obtenidos es una polinómica cúbica, presentando un coeficiente de correlación R2 de 0,9938 lo cual significa un excelente ajuste a los puntos obtenidos.

Para el caso del sensor 10-HS la curva que mejor se ajusta a los valores obtenidos es una polinómica cuadrática (figura 8), presentando un buen ajuste con un coeficiente de correlación R2 de 0,9951. El rango de esta curva se encuentra desde una valor mínimo de humedad (residual) de 0,05 para 884 RAW y un valor máximo de contenido de humedad (saturada) de 0,41 para 1425 RAW.

Por último se puede indicar que para el caso del sensor EC-5 la curva que mejor se ajusta a los valores obtenidos es una polinómica cuadrática, presentando un coeficiente de correlación R2 de 0,9958 lo cual es un excelente ajuste a los puntos obtenidos. El rango de esta curva se encuentra desde una valor mínimo de humedad (residual) de 0,09 para 770 RAW y un valor máximo de contenido de humedad (saturada) de 0,40 para 1040 RAW.

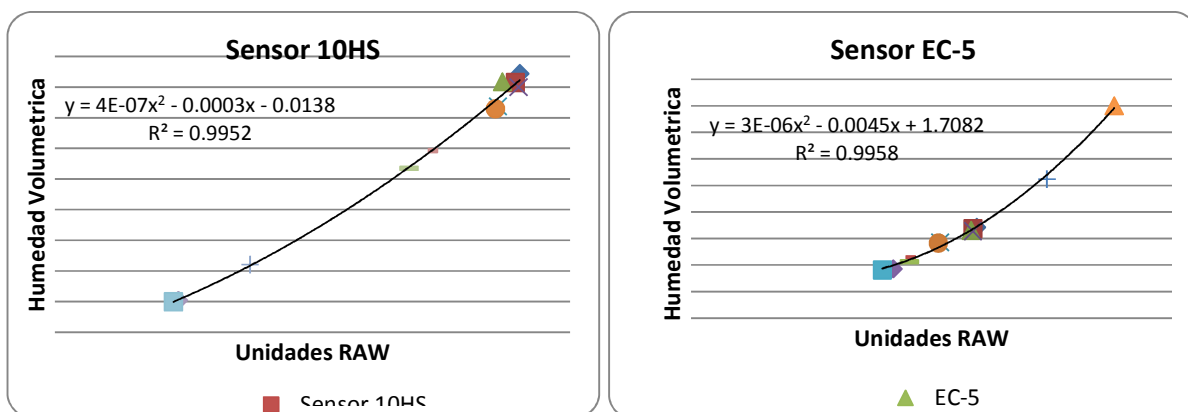


Figura 8. Curvas de calibración del sensor 10-HS y del sensor EC-5

Como resumen de las calibraciones efectuadas se presentan en la tabla 4 los valores obtenidos para el ajuste de las ecuaciones de los diferentes sensores.

Tabla 4. Coeficientes de las ecuaciones polinómicas de calibración de cada sensor. Ecuación ax^3+bx^2+cx+d

Sensor	Grado	a	b	C	d	R ²
EC-5	2	-	0,00000314830	-0,0045361467	1,708190867588	0,9958372885
10 HS	2	-	0,000000422279	-	-	0,99519660634
				0,00030137179	0,013835371064	
5-TE	3	0,000000000423	0,000000868792	-0,0001151009	0,027395965218	0,99387483844

VARIABLES MONITOREADAS

Para determinar si las variaciones que se producen en el suelo son producto de alguna falla de las estructuras (conducto o lagunas artificiales) es necesario conocer además de las variaciones de humedad en la zona de implantación del conducto las variaciones de humedad que ocurren en los alrededores de la zona donde no se encuentran las obras y que son producto de las variaciones climáticas y de eventuales aplicaciones de riego.

Humedad

La principal variable a monitorear es la humedad del suelo. La variación de la humedad en el suelo a diferentes profundidades permitirá realizar una detección temprana de las eventuales pérdidas de agua tanto de las lagunas como del conducto de Aguas Cordobesas.

Los valores de humedad en el suelo varían desde la humedad de saturación hasta humedades muy bajas durante los periodos sin precipitación.

Nivel freático

Los movimientos del nivel freático (tanto ascensos como descensos) son más funciones regionales que locales. Para identificar si el cambio en la humedad del suelo se ha producido por algún cambio estacional y regional o es producto de un fenómeno local, es necesario monitorear los niveles freáticos de la zona. Los instrumentos para realizar éste tipo de medición son los piezómetros. Para la obtención en continuo del nivel piezométrico, existen diferentes propuestas tecnológicas en función del sensor utilizado y del principio físico en el que se basan.

El conjunto pozo de observación y sensor denominado Unidad N°4 fue instalado en la zona cercana al Club House y su ubicación geo referenciada es latitud 31°28'23,71" S, longitud 64°9'05,30"O.

Precipitación y temperatura

En la unidad N° 3 se ha colocado un pluviógrafo y un termómetro conectados al data logger de los sensores de humedad de la estación que permiten la recolección automática de registros de estas variables, que permiten correlacionar las mismas con los perfiles de humedad del suelo.

RECOLECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

La recolección e interpretación de los datos se realiza mensualmente por especialistas de la Universidad Nacional de Córdoba, de las Cátedras de Hidráulica Subterránea de la Maestría Mención en Recursos Hídricos y de la Especialización en Hidráulica de la FCEFYN.

A modo de ejemplo se presentan los resultados de una unidad para el periodo de monitoreo comprendido entre el 28 de Noviembre al 31 de Diciembre del 2012.

Los valores de humedad de saturación y humedad residual para cada tipo de suelo se encuentran entre 41% y 0,4% por lo que estos serán los valores máximos y mínimos de referencia que se tendrán en cuenta en las mediciones para los sensores EC-5, 10-HS y 5-TE. No obstante los sensores pueden medir humedades superiores a la de saturación, esto son mediciones de agua libre.

Resultados de la unidad 1

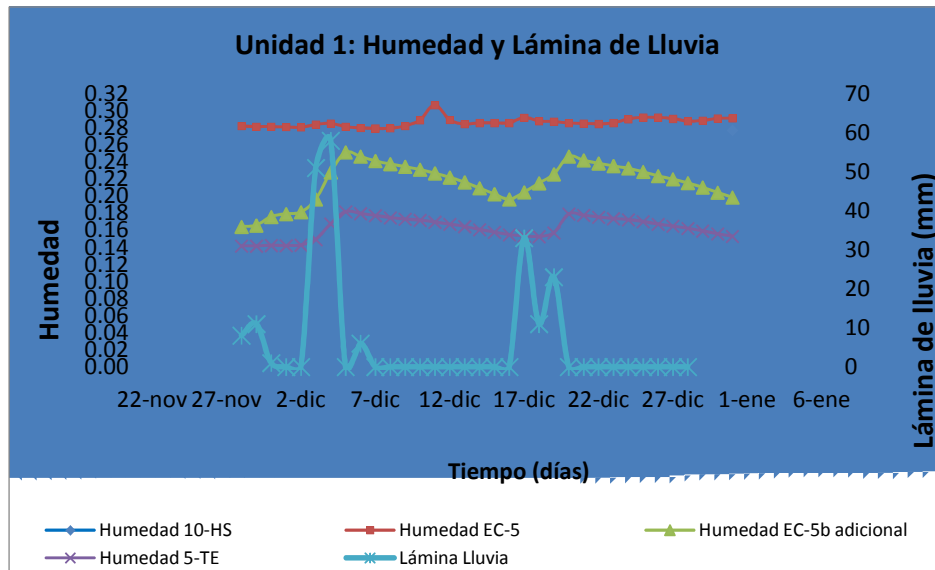


Figura 9. Medición de los sensores EC-5b y 5-TE a 0,30 m, 10-HS a 1m y EC-5 2,70 m. 28-11-12 hasta 31-12-12

El perfil de humedad que se muestra en la figura 8 pertenece a las mediciones tomadas en la unidad 1, se observa que el sensor EC-5 ubicado a una profundidad de 2,70 m, presenta una humedad promedio de 28,6% con desviación estándar de 0,053%. Manteniéndose durante el periodo de medición dentro de un rango bastante estable y sin cambios significativos que evidencien la presencia de un cuadro de humedecimiento masivo acontecido recientemente.

El sensor 10-HS (figura 8) registró un promedio de humedad del 27,3% con desviación de 0,38%. Presentando al igual que el sensor anterior valores muy estables dentro del periodo de medición y ligeramente superiores a los meses anteriores atento a la estación del año en que nos encontramos coincidentes con los ciclos de lluvias.

Los sensores EC-5 y el 5-TE (figura 8) ubicados a 0.3 m de la superficie del suelo muestran una fluctuación similar en los referente a la variación del contenido de humedad del suelo. Advirtiéndose que dichas fluctuaciones se corresponden con las lluvias acontecidas en el periodo de análisis. En lo referente a los valores propiamente dichos, el contenido de humedad, presentó promedios de 21,6% y 16,3% y desviaciones de 2,35% y 1,23% de humedad durante el periodo monitoreado. Ambos sensores presentan incrementos de humedad durante la lluvias ocurridas el 3, 17, 18 y 19 de diciembre con diferencias en sus picos alcanzados, donde el sensor EC-5 registra un pico máximo de humedad de 25,10% mientras que el sensor 5-TE alcanza un valor de máximo de 18,20%.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados, se puede indicar que el sistema de sensores para el monitoreo del suelo representa una herramienta de suma utilidad para la determinación de humedades naturales del suelo a distintas profundidades sin la necesidad de efectuar excavaciones complicadas y onerosas.

El sistema de sensores no requiere de un laboratorio ni personal para la determinación de las humedades del suelo siendo suficiente realizar la descarga de datos con una notebook.

Los costos de monitoreo mediante sensores de humedad resultan marcadamente inferiores a cualquier otra metodología que requiera la extracción de muestras in situ para la determinación de humedades en diferentes momentos del año.

La recolección de datos cada 15 días por parte de un operario permite detectar en forma precoz cualquier tipo de pérdida que pueda surgir tanto en la conducción como en las lagunas del campo de golf y disparar así los mecanismos de alerta a las distintas dependencia involucradas a fin

de realizar los trabajos de reparación que eviten daños mayores tanto en las propiedades aledañas como en la conducción de agua potable que abastece a miles de personas en la zona sur de la ciudad de Córdoba.

Para la obtención de las mediciones de campo y a fin de disminuir el error en la toma de datos, se realizaron, previamente, la calibración de los equipos utilizados.

En relación a los sensores de capacitancia se debe indicar que todos los sensores de capacitancia instalados en suelos, aun con características similares, deben ser calibrados con el objetivo de mejorar su precisión dado la influencia en la medida de otros factores independientes al contenido de humedad como por ejemplo la variabilidad del pH o la conductividad eléctrica dentro de la matriz porosa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FCEFYN Urbanizaciones Residenciales (2011). "Convenio para monitoreo de humedad", Córdoba, Argentina.

Hazen, A. (1892). "Some physical properties of sand and gravels, with special reference to their use in filtration". 24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health, Pub. Doc. N°34, 539-556.

Linares, J. (2012) Aplicación de un Modelo Unidimensional para Flujo en Suelos Saturados y No Saturados y Transporte de Herbicidas. Aplicación en Zona Centro de La Provincia de Córdoba. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba.

Robinson, D.A.; Campbell, C.; Hopmans, J.W.; Hornblukle, B.; Jones, S.B.; Knight, R.; Ogden, F.; Selker, J. y Wendroth, O. (2008). A review vision for soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observations. *Vadose Zone Journal*, 358–389.

Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1948); *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Ed. John Wiley and Sons.

www.decagon.com

www.google.com