

Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo

Carlos Schugurensky y Flavio Capraro

Instituto de Automática (INAUT). Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

e-mail: carlosu@inaut.unsj.edu.ar; fcapraro@inaut.unsj.edu.ar

Resumen: Se describen las características de un sensor capacitivo de humedad de suelos, desarrollado en el Instituto de Automática (INAUT). Cada sensor incluye un sistema de comunicación digital que permite conectar hasta 32 sensores en una red RS-485. Se ha diseñado también un sistema de control automático de riego a lazo cerrado, basado en PC, con parcelas agronómicas homogéneas (PAH). El sistema de control actúa sobre la bomba y las válvulas de riego con el objetivo de mantener la humedad del suelo, en cada PAH, en un valor apropiado para cada etapa fenológica del cultivo. El sensor y el sistema de control de riego se ensayan a campo en una explotación comercial de vid y en una explotación experimental de olivo. Finalmente, se presentan gráficos de la respuesta del sistema de control en ambas aplicaciones.

Abstract: The characteristics of a capacitive soil moisture sensor, developed at the Instituto de Automática (INAUT), are described. Each sensor includes a digital communication system that allows connecting up to 32 sensors in a RS-485 network. Also, an automatic, closed loop, PC-based, irrigation control system was designed. The irrigation system is site-specific type, with agronomical homogenous parcels (AHP). The control system acts on the irrigation pump and valves to maintain soil moisture in each AHP in an appropriate value for each phenological stage of the crop. The sensor and the control system are field tested in a grape commercial farming and in an olive experimental farming. Control system response graphics for both applications are finally presented.

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de San Juan, Argentina, se encuentra enclavada en una región desértica en la que el agua disponible para todo consumo, incluido el riego agrícola, proviene de los glaciares y de la nieve acumulada durante el invierno en la cordillera. Las precipitaciones son despreciables, del orden de 98 mm/año en promedio.

Actualmente se ha verificado, en varias regiones del mundo, que en cultivos tradicionalmente dependientes solo de la lluvia, la complementación de la misma con riego artificial permite la obtención de significativos mayores rindes y mejoras importantes en la calidad de los productos finales. La medición de la humedad de los suelos permite tomar decisiones sobre cuando y cuanto regar. Existen también cultivos, por ejemplo la vid, en la que se verifica que la aplicación de estrategias de riego basadas en la restricción hídrica permite optimizar el producto precio x rinde (\$·kg). Esta estrategia mejora la calidad de las vides destinadas a vinificación, por las que se paga un mayor precio, pero al mismo tiempo disminuye los rindes [1],[2]. La aplicación de estas estrategias requiere de la medición continua de la humedad de los suelos para llevar a cabo el control de la magnitud de la restricción hídrica durante el periodo apropiado.

Por estas razones, se considera importante realizar desarrollos tendientes a la optimización en el uso de los recursos hídricos. En el INAUT se ha inventado un sensor

de humedad y temperatura de suelos y un sistema de control automático de riego, a lazo cerrado, que utiliza el sensor desarrollado. Dicho sensor tiene patente en trámite en Argentina desde noviembre de 2005 y en Chile desde noviembre de 2006.

Este desarrollo ha recibido un premio en el rubro Innovaciones para el Agro en el Concurso Nacional de Innovaciones, 3ª edición, INNOVAR 2007, que realiza anualmente el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, Argentina.

1.1 Objetivos del trabajo

Las investigaciones indican que diferentes tipos de sensores no tienen el mismo comportamiento en todas las condiciones [3]. Existen sensores que no son capaces de capturar los rápidos cambios de la humedad del suelo en suelos gruesos (por ejemplo arenosos). Los sensores resistivos Watermark típicamente no producen mediciones confiables para SWP (Soil Water Potential) menos negativos que -10 kPa [4]. En un trabajo reciente [5] que utiliza sensores resistivos Watermark las mediciones de los mismos fueron comparadas con las de tensiómetros verificándose, en ciertas condiciones, diferentes valores de humedad y diferente tendencia. Estas diferencias se atribuyen a las características intrínsecas de cada sensor.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) desarrollar y ensayar un nuevo sensor de humedad de suelos que incluye comunicación digital, 2) desarrollar y ensayar un sistema

automático de control de riego a lazo cerrado que incluye el concepto de riego agronómico, diferente al riego hidráulico y 3) realizar los ensayos en aplicaciones a campo en explotaciones comerciales o experimentales con el objeto de evaluar la respuesta del sensor y del sistema de control.

1.2 Tecnologías para la medición de humedad de suelos

Los sensores de humedad de suelos más conocidos y que se ofrecen comercialmente son los siguientes: Sondas de neutrones, tensiómetros, resistivos y aquellos que miden la constante dieléctrica del suelo.

Las sondas de neutrones fueron prohibidas en muchos países por su uso de la radiactividad. Los tensiómetros tienen limitaciones en el rango de medición y requieren de mucho mantenimiento. Los resistivos se basan en la medición de la resistencia eléctrica o su inversa la conductividad de los suelos, la cual varía con la humedad; el problema de estos sensores es que la conductividad también cambia con la temperatura y con la salinidad del suelo y del agua de riego por lo que es necesario corregir las lecturas utilizando sensores de temperatura. Necesitan mantenimiento periódico y frecuente. Todavía hay quien usa este tipo de sensores los que actualmente son considerados de tecnología superada.

Los que miden la constante dieléctrica del suelo son la tecnología del momento. Se basan en que la constante dieléctrica del suelo experimenta cambios importantes con la introducción de agua en el terreno. Esto es debido a que la constante dieléctrica relativa del suelo seco está entre 3 y 4, mientras que la del agua está entre 80 y 85. Existen distintos principios que permiten medir la constante dieléctrica. Entre los más utilizados se destacan los capacitivos y los de tecnología TDR (Time Domain Reflectometry). Solamente aquellos sensores que miden la constante dieléctrica a altas frecuencias, superiores a 27 MHz, realizan mediciones que no son enmascaradas por la temperatura y la salinidad del suelo y del agua de riego [6]. Marcas conocidas de sensores que miden la constante dieléctrica del suelo son: ECH₂O (de Decagon, USA, TDR), Troxler (USA, capacitivo), Enviroscan y Diviner (de Sentek, Australia, capacitivo). El sensor INAUT es capacitivo.

Solamente los sensores capacitivos de Sentek (Enviroscan y Diviner), un modelo de Decagon y el INAUT trabajan por sobre los 27 MHz. El sensor INAUT funciona entre 55 y 75 MHz. Esta es una diferencia muy importante a tener en cuenta cuando se comparan sensores de humedad de suelos.

Además de su principio de funcionamiento, los sensores de humedad de suelos se diferencian en dos tipos según sea su forma de instalación: permanentes o con tubo de acceso.

Los sensores permanentes se instalan en el suelo, en el lugar y a la profundidad a la que se desea medir, quedando instalados durante años si fuera necesario. No deberían requerir mantenimiento alguno. Este tipo de sensores es el apropiado para el control automático del riego a lazo cerrado. El sensor INAUT es de este tipo y para facilitar su inclusión en un sistema de control en agricultura, donde las distancias son en general grandes, su diseño incluye un sistema digital de comunicaciones que permite enviar sus

mediciones a largas distancias, 1200 m o más si fuera necesario. Esta característica es también muy importante cuando se comparan sensores.

Por otro lado, los sensores que trabajan con tubo de acceso necesitan la instalación permanente de tubos de PVC de 3 a 5 cm de diámetro y 1,20 m de profundidad para el acceso de los sensores que se introducen manualmente. Los tubos son instalados en todos aquellos lugares donde se quiere obtener un perfil de la humedad a lo largo de la profundidad del suelo. Los sensores australianos de Sentek (Enviroscan y Diviner) son de este tipo. El Enviroscan tiene varias sondas instaladas cada 10cm sobre el soporte que se introduce en el tubo. La sonda Diviner tiene un solo sensor que mide cada 10cm a medida que se introduce en el tubo de acceso. Este tipo de sensores no puede usarse para control automático del riego y se utiliza un datalogger para almacenar las mediciones realizadas en cada lugar.

2. SENSOR DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA Y TEMPERATURA DE SUELOS

La invención consiste en un dispositivo electrónico que se instala en el suelo, a la profundidad que se desea y mide la humedad volumétrica y la temperatura del suelo que lo rodea. Principalmente consta de dos partes (Fig. 1):

La primera parte es el dispositivo sensor propiamente dicho. Consiste en un capacitor de placas planas paralelas cuya capacitancia varía con la humedad del suelo.

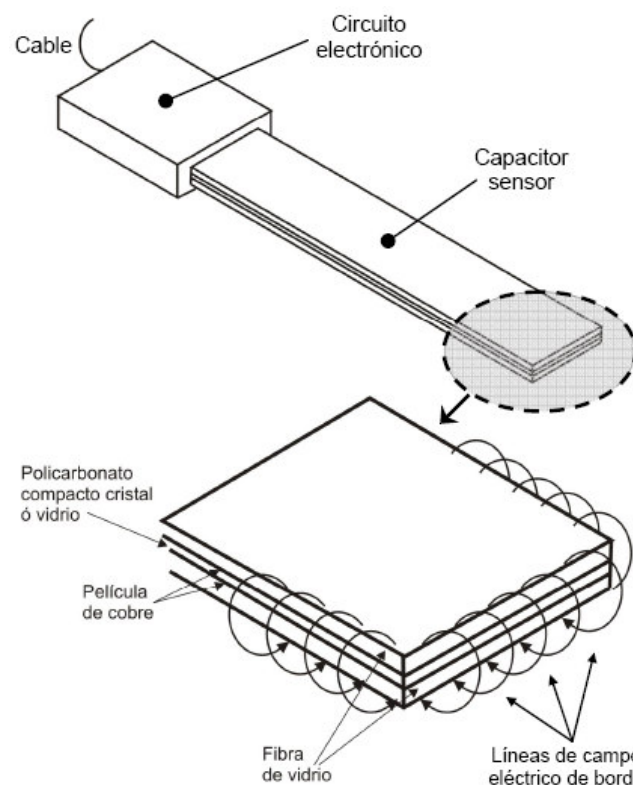


Fig. 1: Descripción del cuerpo del sensor capacitivo de humedad y principio de medición.

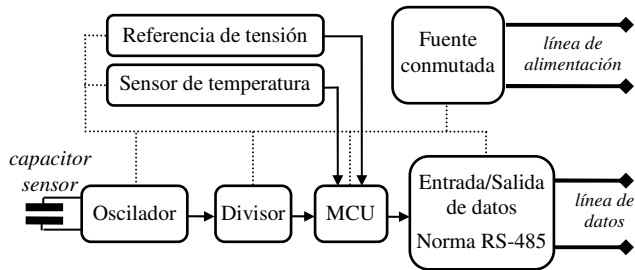


Fig. 2: Esquema interno del sensor desarrollado.

La segunda parte es el circuito electrónico que permite convertir el valor de la capacitancia mencionada en una señal eléctrica útil, codificarla y transmitirla digitalmente. Además se incluye un sensor de temperatura, la conversión analógica/digital de la señal y su codificación y transmisión. Al circuito mencionado se anexa también una fuente de alimentación conmutada (Fig. 2).

Dado que los sensores están en contacto directo con el suelo y deben permanecer durante años en esa posición, el circuito electrónico y el capacitor sensor han sido diseñados con un sistema de aislamiento con resina y pintura epoxy que impide que el agua penetre en su interior y altere su funcionamiento.

2.1 Descripción del capacitor sensor de humedad.

Se trata de un capacitor de placas planas paralelas separadas por un dieléctrico. Las placas planas paralelas están construidas en fibra de vidrio con una cara cubierta por una película de cobre, la cara cubierta con cobre se instala hacia el interior, en contacto directo con el dieléctrico. El dieléctrico es una placa de policarbonato compacto cristal.

Esta estructura fue diseñada para enfatizar la capacitancia generalmente denominada parásita que se genera en los bordes con el objeto de que las líneas de campo eléctrico pasen por el suelo que lo rodea (Ver figura 1). Esto permite la generación de dos capacitores en paralelo, cuyas capacitancias se suman. Uno de los capacitores tiene capacitancia constante C_c cuyo valor es:

$$C_c = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A / d \quad (1)$$

donde ϵ_0 : constante dieléctrica del vacío; ϵ_r : constante dieléctrica relativa del policarbonato; A : área de cada placa; d : distancia entre placas o espesor del dieléctrico. Siendo el valor en cada caso: $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF}\cdot\text{m}^{-1}$; $\epsilon_r = 3$; $A = 64 \text{ cm}^2$; $d = 4 \text{ mm}$.

El otro capacitor es la capacitancia de borde que se forma a lo largo de todo el perímetro de la estructura de placas planas paralelas. La constante dieléctrica relativa de este capacitor es la del suelo, por lo que pasan las líneas del campo eléctrico, la que varía según la cantidad de agua que contenga. Por lo tanto se trata de una capacitancia variable $C_V(H)$ cuyo valor depende de la humedad volumétrica H del suelo que rodea el sensor. La capacitancia total C es:

$$C = C_c + C_V(H) \quad (2)$$

2.2 Descripción del circuito electrónico

Como se indica en la Fig. 2, el capacitor sensor se conecta a un circuito oscilador de alta frecuencia. La frecuencia de oscilación, en todo el rango de medición, varía entre 55 y 75 MHz. Con el objeto de que la alta frecuencia de oscilación pueda ser medida por el microprocesador, la misma se divide aproximadamente por 1000. El sensor de temperatura es un componente de estado sólido cuya señal de salida analógica se conecta a la entrada del convertidor A/D del microprocesador. Con las dos señales digitalizadas, humedad volumétrica y temperatura, el microprocesador genera un paquete de datos (protocolo propietario). En la cadena se incluye el identificador del sensor, la medición de las dos señales medidas y un código de redundancia cíclica para la verificación de errores durante la transmisión.

El microprocesador utiliza un driver de comunicaciones que permite enviar y recibir los paquetes de datos, utilizando la norma física RS485 en modo half-duplex. Utilizando un driver estándar se puede instalar hasta 32 sensores sobre el mismo bus. Si se requiere instalar más sensores en la red se utiliza un driver especial el cual permite instalar hasta 128 dispositivos.

Todos los circuitos electrónicos mencionados son alimentados en tensión por una fuente conmutada. Esta fuente es alimentada con una tensión continua que llega desde una fuente general situada en la sala de control. La fuente conmutada opera con una tensión de entrada que puede variar entre 9 y 36 V entregando siempre 5 V a la salida y tiene además muy baja disipación térmica. Dado que la tensión que se genera en la sala de control se va atenuando a lo largo de la línea de alimentación, esta característica de la fuente conmutada permite alimentar el circuito electrónico del sensor siempre con la misma tensión de 5 V, cualquiera sea su posición en la línea común de alimentación.

2.3 Calibración y comparación con un sensor comercial

Los sensores entregan una medición de humedad volumétrica que debe ser calibrada para cada tipo de suelo. Se han realizado en laboratorio [7] curvas de calibración para varios tipos de suelo que se encuentran en San Juan, Argentina, utilizando contenedores de 10 litros de volumen. Se encontró una relación lineal entre la humedad volumétrica del suelo y los valores indicados por el sensor en los suelos evaluados. Se observó una alta correlación con R^2 mayores a 0,98 para suelos arenosos y francos y entre 0,93 y 0,97 para franco arcillo limoso. Asimismo se observó valores de R^2 altos cuando se repitieron las experiencias con el mismo tipo de suelos.

Comparando estos resultados con los obtenidos con un sensor comercial [8] con R^2 de 0,94 se verifica que el sensor INAUT tiene un comportamiento similar o levemente superior. Cabe destacar que los sensores comerciales, incluido el de la referencia [8] entregan una señal de salida analógica en tensión cuyo alcance de transmisión no supera los 15 metros.

3. CONTROL DE SISTEMAS DE RIEGO

El riego agrícola adquiere su verdadera importancia cuando la programación del mismo es la correcta: ello implica determinar adecuadamente el periodo de tiempo entre riegos sucesivos y la cantidad de agua aplicada en cada periodo. En este sentido, el control del sistema de riego juega un rol importante a la hora de llevar a cabo una determinada estrategia de riego sobre el cultivar. El sistema de riego puede ser controlado de forma manual o automática. A su vez un sistema de riego automático puede ser a lazo abierto (temporizado) o a lazo cerrado.

En la operación manual el operario de riego efectúa la apertura y cierre de las válvulas de riego basándose en su experiencia o en recomendaciones surgidas de mediciones de humedad de suelo realizadas en forma discontinua, por ejemplo una vez por semana. Una técnica más avanzada que la anterior es la operación automática a lazo abierto o temporizada, donde se utiliza un temporizador mecánico o electrónico para efectuar la tarea antes realizada de forma manual. En este tipo de control el periodo y la dosis de riego permanecen fijos según los tiempos programados en el temporizador.

En la operación automática a lazo cerrado las acciones de control (accionamiento de la bomba de agua y de las válvulas de riego) se ejecutan con el objeto de alcanzar una referencia de humedad en el suelo. Dicha referencia es establecida por el agrónomo según el tratamiento de riego a ser aplicado.

Una forma de mejorar aún más el desempeño de los controladores automáticos realimentados es agregar cierto grado de inteligencia a los mismos, mediante el diseño de algoritmos de control avanzados basados en modelos. Este tipo de controladores, conocidos como controladores de riego inteligente [9], suelen presentar características adaptables y predictivas que evalúan permanentemente la dinámica del sistema y actúan en base a predicciones [2],[10]. El riego inteligente se caracteriza por monitorear de forma continua los niveles de humedad del suelo junto a otras variables involucradas en el sistema suelo-planta-atmósfera (tales como estado hídrico del cultivo, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento, evapotranspiración, entre otras) y ajustar el suministro de agua con el objeto de minimizar un índice de comportamiento determinado.

3.1 Sistema de control automático de riego desarrollado

El sistema de control propuesto requiere la realización previa de un estudio de suelos con el objeto de determinar las parcelas agronómicas homogéneas PAH. Una PAH es aquella zona que tiene el mismo tipo de suelo y el mismo cultivo. En la Fig. 3 se representa una superficie a regar en la cual se ha encontrado cuatro PAH. Cada PAH es regada independientemente de las otras a través de su válvula de riego. Este sistema de riego se denomina riego agronómico. Es muy diferente al riego hidráulico que se diseña para regar toda la superficie de la misma manera. En cada PAH se requiere la instalación de un sensor. En algunos casos se instala más de un sensor si la parcela es muy grande y se

toma el promedio de las mediciones.

El controlador de riego diseñado está compuesto por tres unidades: Programa de control, PC y módulo de alimentación y comando. La PC se emplea para ejecutar el algoritmo de monitoreo de la humedad en cada PAH, el algoritmo de control y el accionamiento de su correspondiente válvula de riego. El módulo de alimentación y comando contiene los componentes necesarios para alimentar los sensores y los relés de accionamiento de las válvulas y la bomba de riego según las ordenes emitidas desde la PC a un módulo de actuación mediante el bus RS485.

El programa de control inicialmente establece la alimentación de los sensores. Transcurrido un tiempo de estabilización, encuesta cada sensor. El algoritmo de control de riego utiliza las mediciones para determinar las acciones de control que se envían al módulo de comando. El algoritmo utilizado en las aplicaciones que se describen seguidamente es de tipo si/no.

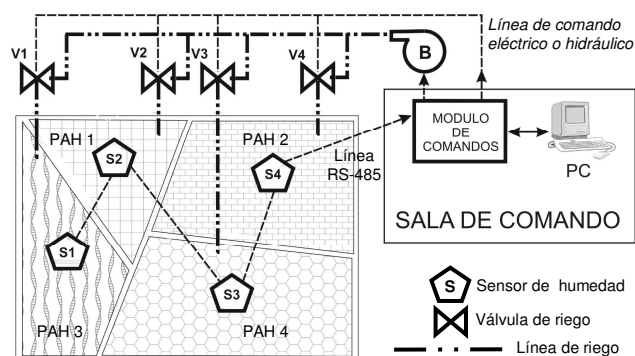


Fig. 3: Esquema general del sistema de control de riego automático realimentado.

4. APLICACIÓN EN CAMPO

Con el objetivo de ensayar el funcionamiento de los sensores y del sistema de control propuesto, se efectuaron dos experimentos a campo en la provincia de San Juan. Uno de ellos se realizó en un viñedo comercial y el otro en un olivar experimental. En ambos casos se aplicaron dos tratamientos de riego; *Tcc*: tratamiento sin restricción hídrica donde la referencia de control se fija a nivel de capacidad de campo y *Trh*: tratamiento de restricción hídrica, fijando la referencia de control por debajo del nivel de capacidad de campo. Dichos tratamientos fueron aplicados desde la etapa de post-cuaje a cosecha. Los sensores de humedad se sitúan bajo tierra a 30 cm de profundidad (lugar de gran densidad radicular). Esta zona es la de mayor interés y allí se desea mantener constante el nivel de humedad.

4.1 Experimento 1: Control de humedad en vid

El experimento se efectúa en un viñedo cv. Malbec de 5 ha ubicado en La Chimbera, San Juan, perteneciente a la empresa Vitícola Cuyo S.A.. El mismo es irrigado por un sistema de riego por goteo con dosificadores auto compensados de $3 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 80 cm. Luego de efectuar el

análisis de suelo, se demarcaron cuatro PAH. El suelo de las PAH 1 y 3 son de tipo franco arenoso, el de la PAH 2 arenoso franco y el de la PAH 3 es franco arcillo arenoso. Los sensores se instalaron a 30 cm de profundidad. La longitud de la red de comunicación RS485 fue de 495 m. En las PAH 1, 2 y 4 se aplicó el tratamiento *Tcc*, mientras que en la PAH 3 el tratamiento *Trh*. Las Fig. 4 y 5 muestran la evolución temporal de la humedad del suelo en las PAH 1 y 3. Se fijó un tiempo de muestreo de 1min.

4.2 Experimento 2: control de humedad en olivo

El experimento se efectúa en un olivar cv. Arbequina de 4 años de edad y 1 ha de superficie, con marco de plantación intensivo (2 m x 6 m), ubicado en la Estación Experimental Agronómica Pocito del INTA, San Juan. El olivar es irrigado con un sistema por goteo con dosificadores auto compensados de 2 L·h⁻¹ cada 65 cm. Luego de efectuar el análisis de suelo, se demarcaron dos PAH donde se efectuaron los tratamientos de riego propuestos. Los sensores se instalaron a 30 cm. de profundidad. La longitud de la red de comunicación RS485 fue de 560 m. La evolución temporal de los mismos es presentada en las Fig. 6 y 8. Con el objetivo de resaltar el riego de alta frecuencia efectuado, en la Fig. 7 se presenta el comportamiento del sistema para los últimos 12 días del tratamiento a capacidad de campo. Se fijó un tiempo de muestreo de 15 min.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Analizando las gráficas presentadas, puede deducirse que el sistema de control automático desarrollado funciona aceptablemente. Se mantiene la humedad del suelo en cada PAH alrededor de la referencia pero con excesos positivos en la experiencia en vid entre 2,5 y 5 % de humedad volumétrica. En el experimento con olivo se destacan aún más los excesos positivos de humedad con relación a la referencia estando entre 4 y 7 % de la humedad volumétrica. Esto se debe a que se fijó un tiempo de muestreo de 15 min, superior al del experimento en vid que fue de 1 min. Aún con los excesos positivos verificados en ambos experimentos, la amplitud de las variaciones de humedad del suelo son considerablemente menores que las producidas con riego tradicional. Además cabe destacar que los excesos positivos en este sistema de riego son instantáneos por cuanto nunca se alcanza el nivel de saturación del suelo. Con riego tradicional los excesos positivos se mantienen en su máximo por un tiempo prolongado hasta que se logra abandonar el estado de saturación. La utilización de un algoritmo de control más elaborado y con un tiempo de muestreo apropiado permitirá que la humedad real se aproxime con menores variaciones a la de referencia.

En ambas experiencias los sensores han sido capaces de medir las rápidas variaciones de la humedad volumétrica que exige el sistema de control para mantener su valor cercano al de referencia. Las variaciones de humedad volumétrica por debajo de la referencia se deben al retardo que se produce desde el inicio del riego hasta que el frente húmedo llega al sensor situado a 30 cm de profundidad.

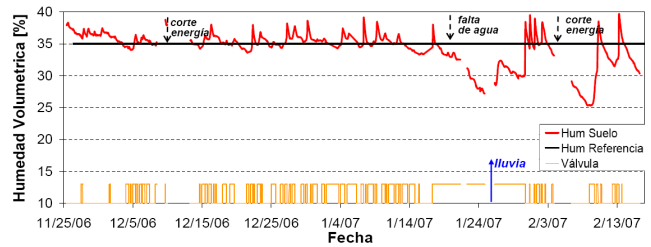


Fig. 4: Riego automático en vid. Tratamiento de riego a capacidad de campo (humedad de referencia 35%).

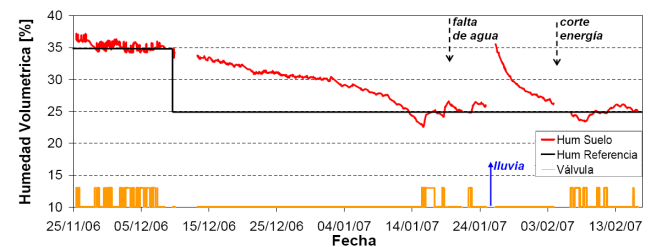


Fig. 5: Riego automático en vid. Tratamiento de riego con restricción hídrica luego de post-cuaje hasta cosecha (humedad de referencia 25%).

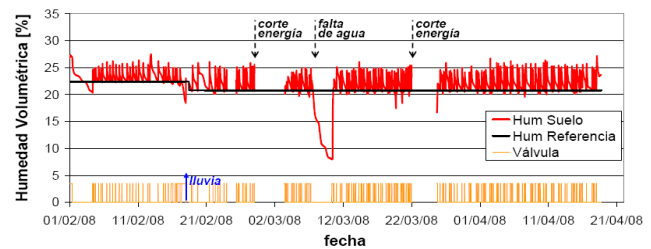


Fig. 6: Riego automático en olivos. Tratamiento de riego a capacidad de campo (la humedad de referencia se modificó de 22,5 a 21%)

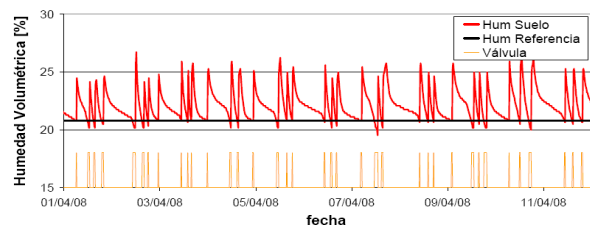


Fig. 7: Riego automático en olivo. Riego de alta frecuencia observado en los doce últimos días del tratamiento a capacidad de campo.

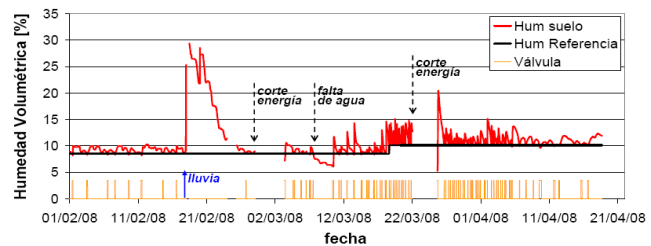


Fig. 8: Riego automático en olivo. Tratamiento de riego con restricción hídrica (humedad de referencia inicial 9%, luego se ajusta a 10%).

En algunos sectores de las gráficas se observa perturbaciones que alejan la humedad del suelo de la referencia, dichas perturbaciones fueron debidas a cortes de energía eléctrica, falta de agua de riego y lluvia. Se verifica, en las mismas gráficas, que el controlador de riego es capaz de retomar el control una vez eliminadas las perturbaciones.

Los sensores permiten medir diferencias de humedad volumétrica del orden de 0,1 %. Como se observa en las Fig. 6 y 8, fue posible fijar valores de referencia con diferencias de 1,5 % y 1 % respectivamente que han sido medidas por los sensores, esto indica su elevada sensibilidad.

Esta elevada sensibilidad permite asegurar perfiles de referencias variables a lo largo de toda la temporada de riego y así garantizar la verdadera aplicación de los tratamientos de riego determinados por los agrónomos. Cabe señalar que lo mencionado representa un avance importante frente a los tratamientos tradicionales en los cuales la humedad volumétrica tiene una variación mucho mayor alrededor de la media requerida lo que no garantiza la continuidad del tratamiento.

Luego de efectuar la cosecha en ambos experimentos, se realizaron distintos estudios sobre las uvas y aceitunas recolectadas, a fin de analizar las diferencias entre los productos conseguidos de cada tratamiento de riego.

En el experimento realizado en vid, se efectuaron análisis físico-químico y sensorial sobre los vinos obtenidos con cada tratamiento. Se observaron mejores características en el vino elaborado con uvas sometidas a la restricción hídrica. Esto concuerda con lo expresado por distintos autores que indican las ventajas de aplicar restricción hídrica en la última fase del ciclo de la vid [1]. El análisis sensorial descriptivo organoléptico para los vinos obtenidos fue realizado por un panel compuesto por 7 degustadores expertos los cuales concluyeron en que había diferencias claras, siendo el preferido el obtenido de Trh. Es importante destacar que se verificó un ahorro de agua de 50% con dicho tratamiento.

El experimento 2, realizado en olivo, se efectuó con el objeto de analizar el consumo de agua del cultivar y la calidad del aceite. Se observó que no hay diferencias significativas en el rendimiento dado en Kg de aceitunas y Kg de aceite elaborado entre ambos tratamientos. Sin embargo, se observó que al aplicar Trh, se mejoró la calidad oxidativa del aceite y se empleó 65% menos de agua.

6. CONCLUSIONES

En el INAUT se han desarrollado los equipos y programas que, junto con los sensores de humedad de suelos, realizan el control automático realimentado del riego. Este sistema permite fijar con precisión el valor de la humedad deseada en cada parcela a lo largo de toda la temporada de riego, de acuerdo con la etapa de desarrollo y crecimiento del cultivo.

Se ha realizado la experimentación a campo de los sensores y el sistema de control verificando que su comportamiento permite realizar con exactitud diferentes tratamientos de riego.

Estos avances tecnológicos en la medición de la humedad del suelo, que se logran con bajos costos, pueden hacer que sea posible la utilización comercial de estas tecnologías para la automatización del riego en la producción agrícola.

En los experimentos descriptos se destaca el ahorro de agua al aplicar el tratamiento de restricción hídrica, como así también las mejoras sustanciales logradas en el producto final. Cabe señalar que también se ahorra agua y se evita la contaminación regando a capacidad de campo respecto al riego tradicional por inundación o melgas.

REFERENCIAS

- [1] Dry, P.R., B.R. Loveys, M.G. Mccarthy, and M. Stoll. (2001). Strategic irrigation management in Australian vineyards. *Jour. Int. des Sciences de la Vingen et du Vin* 35: 129-139.
- [2] Capraro, F., C. Schugurensky, F. Vita, S. Tosetti, A. Lage y D. Patiño (2008). Intelligent irrigation in grapevines: a way to obtain different wine characteristics. 17th IFAC World Congress. Seoul. Korea.
- [3] Muñoz-Carpena, R. and M.D. Dukes (2008). Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops. Document 356. Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu>
- [4] Shock, C.C., J.M. Barnum, M. Seddigh (1998). Calibration of soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the Irrigation Association's 19th Annual, 139-146, San Diego, CA.
- [5] Miranda, F.R., R.E. Yoder, J.B. Wilkerson, L.O. Odhiambo (2005). An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 48, 183-197.
- [6] Watson, K., R. Gatto, P. Weir, P. Buss (1995). Moisture and salinity sensor and method of use. United States Patent number 5,418,466. USA
- [7] Vita, F., C. Schugurensky, R. Carrión y S. Rodríguez (2005). Evaluación del Comportamiento de Sensores de Humedad del Suelo del Tipo FDR de Desarrollo Local, en Relación al Contenido de Agua y a la Textura del Suelo. XX° Congreso Nacional del Agua 2005, Mendoza, Argentina.
- [8] Campbell, C.S. Response of the ECH₂O Soil Moisture Probe to Variation in Water Content, Soil Type, and Solution Electrical Conductivity. Decagon Devices, Inc. www.decagon.com.
- [9] Capraro, F., D. Patiño, S. Tosetti y C. Schugurensky (2008). Neural Network-Based Irrigation Control for Precision Agriculture. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 357-362. China.
- [10] Colin, A. y D. Whitford (1996). Intelligent Irrigation. (Booklet) Cohort International Pty Ltd, Australia.