

Implementación y análisis de diferentes modos de control automático de un sistema de riego por goteo en olivos.

**Flavio Capraro*, Santiago Tosetti*, Vicente Mut*,
Facundo Vita**, Pedro Campillo***

**Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Instituto de Automática (INAUT) - Universidad Nacional de San Juan
Av. San Martín 1109 (oeste) (CP: 5400). San Juan. ARGENTINA.*

*** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - EEA San Juan
Ing. Marcos Zalazar (Calle 11) y Vidart. Pocito. San Juan. ARGENTINA.*

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de tres modos de configuración de un controlador automático de riego por goteo. El control es basado en la medición continua del nivel de humedad en la zona efectiva de raíces del cultivo. Los modos implementados fueron: control temporizado, control por histéresis y control inteligente. Inicialmente, para enmarcar este trabajo de investigación, se presenta la problemática que enfrenta actualmente el sector agrícola en materia tecnológica y de optimización del recurso hídrico; junto a ello se presentan aspectos generales que ayudan a comprender el control automático de un sistema de riego. La metodología consistió en ejecutar a campo los tres modos de control automático propuestos y luego se analizó el desempeño del sistema de riego frente a los niveles de humedad alcanzados y a la cantidad de agua aportada. La experimentación se realizó en un olivar joven situado en la estación experimental del INTA San Juan y para manejar el sistema de riego y obtener información al respecto se utilizó un sistema de monitorización y control automático remoto basado en PC. Se concluye que actualmente la gran mayoría de los agricultores que han adquirido e instalado sistemas de riego presurizado operan a éste de forma manual. Al incluir un sistema de control automático de riego se reduce aún más el uso de agua, donde el mayor ahorro y mejor desempeño se logra al emplear un controlador de riego inteligente, aunque esto requiere mayor inversión en tecnología (computador, sensores, transmisores, etc.) y capacitación.

Abstract

This article presents the implementation of three configuration modes of an automatic controller for drip irrigation systems, based in the continuous measurement of the moisture in the crop roots zone. Modes implemented are: timed control, hysteresis control, and intelligent control. For the sake of completeness, this work also presents an introduction to problems regarding to current irrigation technologies and highlights the need of optimizing water resources. Some general aspects that are useful to understand the automatic irrigation control systems are presented as well. Experiments consisted in implementing in field the three mentioned automatic control modes. Experimental results are the analyzed and compared for soil moisture achieved and water consumption. The experimental field consists of a young olive grove, property of the INTA San Juan, a PC-based control and monitoring system, and a traditional drip irrigation structure consisting of hoses, drippers, pumps and a water reservoir. Based on results obtained from experimentation, it can be concluded that, although most of farmers use their drip irrigation systems in a manual mode, the inclusion of automatic control in irrigation systems results in a reduction in water consumption. In addition, the use of intelligent controllers entails better results not only in water consumption but also in crop quality and soil maintenance.

Palabras Clave

Control automático, riego inteligente, riego por goteo, olivo, humedad de suelo, monitorización en línea.

I- Introducción

Efectuando un análisis del sector agroindustrial de Argentina se observa el rápido crecimiento del área cultivada en zonas de clima árido o semiárido, como en las provincias de San Juan, La Rioja, Catamarca, Mendoza, entre otras; donde se han emplazado nuevos emprendimientos y se han expandido en territorio muchos de los ya existentes, destacándose el cultivo del olivo [1] y de la vid los que han recibido mayor atención [2].

En estas regiones cordilleranas, donde la demanda evaporativa es elevada y el aporte de agua por lluvia es prácticamente escaso, los sistemas de riego juegan un papel importante. Los emprendimientos han debido incorporar avanzadas tecnologías de riego para enfrentar de manera adecuada las limitaciones que presenta la no disponibilidad del agua, como así también la correcta distribución de este recurso escaso y, en muchos casos, de alto costo.

En gran medida, con el empleo de las distintas técnicas de riego presurizado (por goteo, micro-aspersión, subterráneo) se ha logrado mejorar sustancialmente la calidad de los cultivos y los productos derivados, el ahorro de agua y de agroquímicos, y la extensión del área cultivada en zonas que eran consideradas improductivas por no contar con la disponibilidad de agua necesarias para ser regadas de forma tradicional (por manto, por surco, etc.). Hay que destacar también los altos costos de inversión inicial por parte de los empresarios, lo cual es un ocasiones resultan difíciles de enfrentar al momento de la instalación de estos sistemas de riego y el continuo mantenimiento de los mismos.

Haciendo un enfoque particular en el sector olivícola en la provincia de San Juan, se destaca un rápido incremento de la superficie cultivada con olivos, donde la superficie cultivada supera las 18.000 hectáreas, constituyéndose en el segundo cultivo luego de la vid [3]. De manera diferente a los olivares tradicionales, el incremento ha sido acompañado con plantaciones donde se utilizan tecnologías de punta, como alta densidad de plantación, material genético seleccionado, riego presurizado y técnicas de manejo avanzadas en los aspectos de poda, control de malezas, fertirrigación y cosecha; consiguiéndose producción de aceite de oliva de primera calidad y apreciado en el mercado internacional [4].

Hay un alto porcentaje de estos nuevos emprendimientos que han empleado tierras sin derecho de riego, dependiendo exclusivamente de la extracción de agua subterránea. De todas maneras, aún en aquellas propiedades que cuentan con derecho de agua superficial también ha debido emplearse agua subterránea para complementar el riego a fin de alcanzar a cubrir las necesidades hídricas del cultivo. Para todas estas empresas el gasto de energía reservado en bombear agua desde el subsuelo y luego en la distribución dentro de la finca es el principal punto de interés a minimizar dentro de sus costos operativos, esto indica que cualquier mejora en el uso del agua repercute en la rentabilidad de sus negocios.

Luego de visitar, relevar y analizar muchas de las instalaciones de riego instaladas en los emprendimiento y de diversas conversaciones entre las empresas proveedoras de servicios y equipos de riego presurizado, resulta paradójico determinar que el manejo y/o programación de los sistema de riego se efectúa a lazo abierto y de forma manual; es decir, es común notar la ausencia de: sensores que permitan medir o estimar la humedad del suelo, estaciones meteorológicas, controladores de riego automáticos, válvulas de comando remoto, instrumentos que indiquen el consumo de agua y/o energía del sistema de riego, entre otros muchas otras carencias; lo que hacen que toda la tecnología de punta antes mencionada y los esfuerzos por optimizar los recursos se vean desfavorecidos. Esto conlleva que la operación del sistema de riego se efectúe manualmente y programación del riego se determine “a ojo” según la presencia de determinados síntomas en el suelo o el cultivo. Es evidente, y de esperarse, que antes estas situaciones los sistemas de riego se

comporten de modo ineficiente o que no se logren los rindes propuestos a inicio de la campaña, lo cual en muchos casos han llevado al fracaso de las inversiones realizadas.

En este sentido, tal como se manifiesta en otros trabajos [5] [6] [7], es importante destacar que la utilización de controladores de riego que permitan automatizar las aplicaciones de agua en base a mediciones de variables en línea son herramientas necesarias para el control eficiente del sistema de riego y especialmente del manejo del cultivar según los parámetros u objetivos a alcanzar, tanto en cantidad como en calidad.

En forma cooperativa, entre el Instituto de Automática de la UNSJ y la EEA San Juan del INTA se investigan de manera continua estas problemáticas y en los últimos años se han desarrollado distintas alternativas para que los productores locales puedan incorporar en sus emprendimientos las nuevas tecnologías relacionadas a instrumentación, control automático, comunicación y manejo de la información en línea [7]-[10].

Enmarcado por esta idea, se ha elaborado el presente trabajo de investigación a campo, a fin de divulgar y hacer conocer las ventajas de incluir un sistema de control automático en los sistemas de riego presurizado y configurar al mismo de manera conveniente. Las distintas experimentaciones a campo se han realizado en un olivar joven situado en el EEA San Juan del INTA. El objetivo principal de esta publicación es presentar al sector en general las nuevas herramientas tecnológicas disponibles para que pueda identificar fácilmente los beneficios de incorporarla a sus emprendimientos y, en el caso de aquellos innovadores que hoy en día cuentan con tal equipamiento, la importancia de efectuar la correcta determinación y programación del riego evaluando distintos métodos y estrategias.

A- Generalidades de control automático en sistemas de riego

En los últimos años, acompañado por los grandes avances tecnológicos en electrónica, telecomunicaciones e informática, puede observarse que los sistemas de control en línea, la tele-operación remota y la automatización son incluidos día a día en procesos simples hasta muy complejos. En búsqueda de optimizar recursos, simplificar tareas, monitorizar eventos, reducir tiempos, entre otras muchas cosas, los algoritmos de control van ganando terreno y se puede encontrar una gran cantidad y variedad de controladores en todos los sectores de la industria, cuestión a la que la agricultura de precisión no es ajena hoy en día.

Para tener una mejor visión sobre el funcionamiento de los controladores de riego que se pueden encontrar comercialmente o de algunos desarrollos particulares (desde la óptica de la ingeniería control de procesos) se presentaran los conceptos referidos a ello.

En [11] se describe los componentes básicos de un sistema de control (Figura 1) como: (i) entradas o señales actuantes, (ii) componentes del sistema de control y (iii) salidas o variables controladas. Así mismo, los sistemas de control pueden clasificarse a grandes rasgos como: a lazo abierto (no realimentado) o lazo cerrado (realimentado).

Los elementos de un sistema de lazo abierto se pueden dividir en dos partes: el controlador y el proceso controlado. Como se observa en la Figura 1a; una señal de comando (r) se aplica al controlador cuya salida (u) actúa sobre el proceso para controlarlo, de tal forma que la señal controlada (y) se desempeñe de acuerdo a lo preestablecido.

Para que este sistema realice acciones más exactas y se adapte mejor al proceso será necesaria la realimentación desde la salida hacia la entrada. Por ello, la señal controlada (y) es comparada con un valor de referencia (r) y se envía una señal actuante (u) en función de la diferencia entre la entrada y la salida (y) para corregir el error (e). Un sistema de control como el antes descrito con una o más trayectorias de realimentación se denomina a lazo

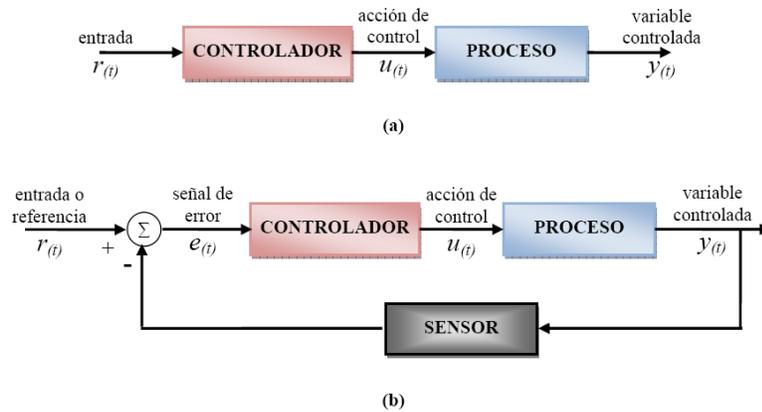


Figura 1: Estructura de los sistemas de control: (a) Lazo abierto y (b) Lazo cerrado

cerrado, el mismo se presenta en la Figura 1b. Debido a que las acciones de control se calculan en función del error presente entre el valor de referencia y la realimentación de una o más variables del sistema controlado también se denominan *sistemas realimentados*.

En los sistemas de riego presurizado la acción de control (u) consiste en abrir y cerrar una válvula solenoides que permiten la circulación o corte de agua respectivamente a las distintas zonas de riego. Las válvulas de riego son comandadas a distancia de manera eléctrica o hidráulica. En las figuras 2 y 3 se presentan de forma ilustrada el control de riego automatizado según las dos estructuras de control anteriormente descriptas.

Comercialmente es muy común encontrar controladores de riego a lazo abierto, denominados temporizadores de riego (Figura 2). Son dispositivos mecánicos o electrónicos que aplican dosis de riego iguales en periodos de tiempo constantes. La principal desventaja que presentan estos sistemas radica al momento de determinar la programación, ya que la misma está basada sobre predicciones indirectas del consumo de agua por el cultivo [12]. Cualquier variación diaria de las condiciones ambientales que modifique el consumo de agua de la planta no son consideradas por el controlador, por lo tanto pueden ocurrir situaciones momentáneas de exceso o déficit de agua. Otra desventaja es la dificultad de implementar estrategias de riego deficitario controlado, debido a la imposibilidad de ajustar en forma precisa las dosis de riego para los diferentes niveles hídricos deseados. Pueden encontrarse algunos modelos que permiten agregar un pluviómetro a fin de cancelar la secuencia de riego en caso de detectarse lluvia. Este tipo de controlador (o computador) es comúnmente encontrado en los sistemas de riegos de mediana y gran envergadura.

En la configuración de lazo cerrado, también conocido como control realimentado, el controlador determina el próximo periodo y dosis en función de la medición de una o más variables involucradas en el sistema suelo-planta-atmósfera [6][7][13][14]. En referencia al control de riego basado en la medición de humedad del suelo, según se presenta en la Figura 3, el controlador es capaz de monitorizar de manera continua los niveles de humedad y ajustar el suministro de agua en periodos cortos y aplicaciones diferentes para mantener constante la humedad o dentro de un rango de interés [12]. Las necesidades de riego serán medidas a intervalos frecuentes pero el agua será aplicada cuando sea requerido.

B- Métodos de control automático para operar el sistema de riego

Dentro del área de control automático de sistemas de riego presurizado (con aspersores, por goteo, etc.) se pueden distinguir al menos tres modos de operación [12], estos son: (i)

control temporizado, (ii) control por histéresis (o entre umbrales) y (iii) control inteligente. Estos conceptos también pueden ser empleados en otras técnicas de riego o de sistemas.

En el *modo de control temporizado* la operación de apertura y cierre de las válvulas de riego se realiza por la definición de tiempos o ciclos fijos de encendido. Esta técnica también es conocida como riego temporizado ya que el periodo entre riegos y la cantidad o dosis de agua que se aplica permanecen fijas según los tiempos establecidos (Figura 2). En el apartado anterior se mencionaron algunas desventajas de los dispositivos temporizados.

En el *modo de control por histéresis* la acción de apertura y cierre se rige por un ciclo de histéresis dentro de dos límites de operación en el que debe permanecer una determinada variable, como por ejemplo el nivel de humedad en el suelo. Este modo de control opera a lazo cerrado ya que utiliza la medición (o realimentación) de alguna variable controlable del sistema (Figura 3). El controlador inicia el riego hasta que la humedad del suelo llega al umbral máximo, allí se detiene el riego; luego la humedad ira descendiendo lentamente hasta llegar al umbral inferior donde nuevamente se iniciará el riego. Este ciclo se repetirá continuamente en base al nivel de humedad medido, por tanto es de esperar que el periodo entre dos riegos sea distinto en cada ciclo. Cuanto más cercano se determina los umbrales del ciclo de histéresis mayor es la frecuencia de riego. Generalmente los valores asignados a los umbrales de inicio y fin de riego se definen en orden a que la humedad del suelo permanezca cercana al nivel de capacidad de campo.

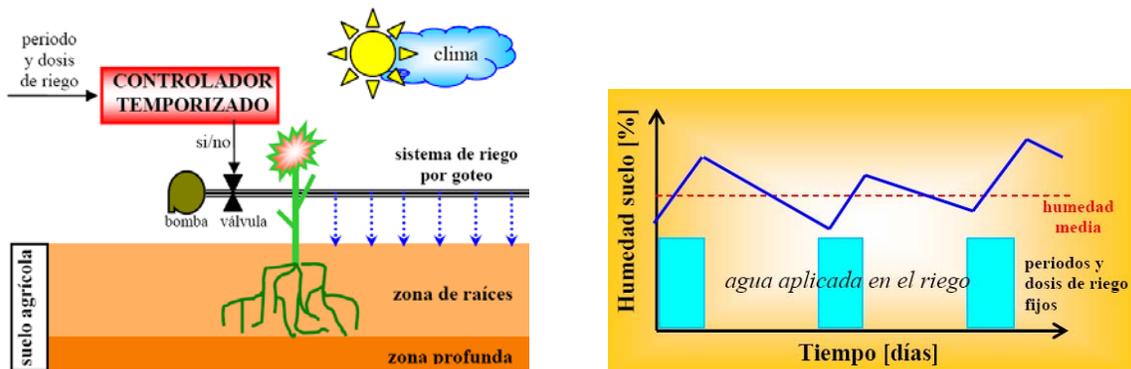


Figura 2. Sistema de control de riego automatizado por tiempos (lazo abierto). Variación de la humedad en el suelo al aplicarse dosis de agua en igual cantidad y en periodos constantes.

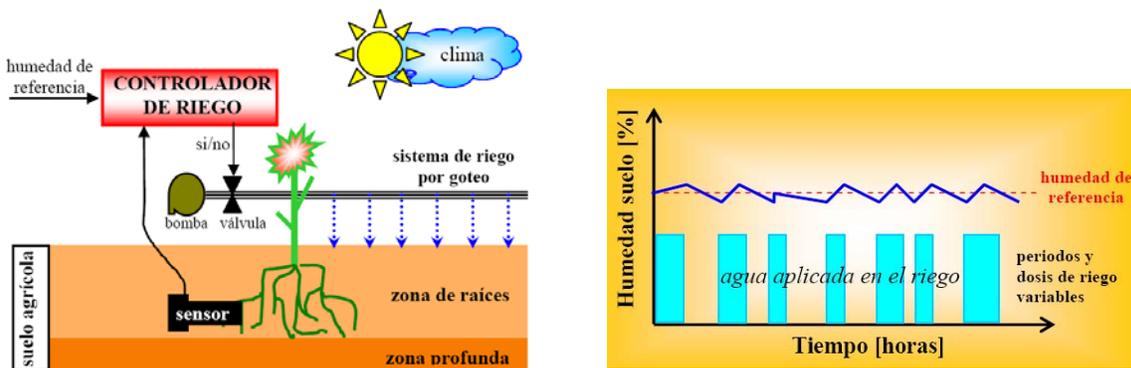


Figura 3. Sistema de control de riego basado en la medición de humedad en la zona de las raíces (lazo cerrado). Evolución del nivel de humedad en la zona de las raíces al aplicarse cantidades de agua variables en periodos de riego irregulares.

Una forma de mejorar el desempeño de los controladores automáticos a lazo cerrado es agregar en el lazo de control mayor grado de inteligencia mediante algoritmos basados en modelos matemáticos que identifiquen al sistema. Esto es conocido como *controlador de riego inteligente* [8][15], suelen presentar características adaptables y predictivas que evalúan permanentemente la dinámica del sistema y actúan en base de predicciones a futuro [16], [17]. En el riego inteligente se monitorean continuamente los niveles de humedad del suelo y se ajustan los suministros de agua en periodos cortos con aplicaciones muy diferentes. En este modo se debe especificar la humedad del suelo requerida y el algoritmo determina (en tiempo real) el instante de inicio y duración del riego necesario para llevar la humedad del suelo a un valor deseado y mantenerse entre las tolerancias especificadas.

Además, esta novedosa técnica de control mide el error producido entre la humedad alcanzada luego de efectuarse un ciclo de riego y la humedad de referencia deseada. Cuando el error excede una tolerancia fijada, el algoritmo modifica los parámetros del controlador a fin de reducir el error en el próximo ciclo de riego y mantenerlo acotado. De ello se dice que el sistema de control posee inteligencia para auto-ajustarse o adaptarse ante cambios, lográndose así que el controlador mejore gradualmente el comportamiento.

II- Elementos del Trabajo y Metodología

A- Localización del experimento y componentes del sistema de riego

Bajo el asesoramiento de distintos investigadores pertenecientes al INTA – EEA San Juan, se determinó que los ensayos en campo fueran realizados en un monte de olivos *cv. Arbequina*, de cinco años de edad. Este monte está situado en la estación experimental INTA-San Juan, ubicado geográficamente en el departamento Pocito, provincia de San Juan (31°39'14.13"S 68°35'15.94"O). El marco de plantación es intensivo de 6m x 2m. Dentro del monte, se seleccionó un pequeño sector, un cuadro de 6 hileras con 30 plantas cada una (2160m²); allí se efectuaron los experimentos a campo. En la Figura 4 se presenta una vista aérea (extraída desde el archivo de GoogleEarth) del sector en cuestión

Un estudio preliminar del suelo indicó que el terreno es uniforme en sus características dentro del cuadro, siendo de textura franco-limoso (volumen de sedimentación 98ml%g) con grava a 80cm de profundidad aproximadamente.

Dentro del monte de olivos se seleccionaron tres zonas homogéneas, o parcelas agrónomicamente homogéneas (PAH), denominadas como: PAH1, PAH2 y PAH3, cada una conformada por dos hileras de olivos, así cada PAH ésta conformada por 60 plantas; dentro de cada una de éstas se consideraron cuatro bloques de medición de humedad de suelo (sensores de humedad alojados a 30cm de profundidad) designados como: B1, B2, B3 y B4. En la Figura 4 se indican las parcelas en recuadro rojo y los puntos de medición con una estrella.

En el olivar se instaló un sistema de riego por goteo con emisores auto-compensados de 2 litros/hora, separados a 80cm. La línea principal de riego se divide en tres sectores, uno para cada PAH. A tal fin, se instalaron tres electroválvulas solenoides que permitieron regar de forma independiente cada parcela. El agua suministrada en cada sector de riego fue registrada continuamente por un caudalímetro. La capacidad hídrica instalada del sistema de riego permitió que todas las zonas fueran regadas de forma simultánea cuando ello fuese necesario.

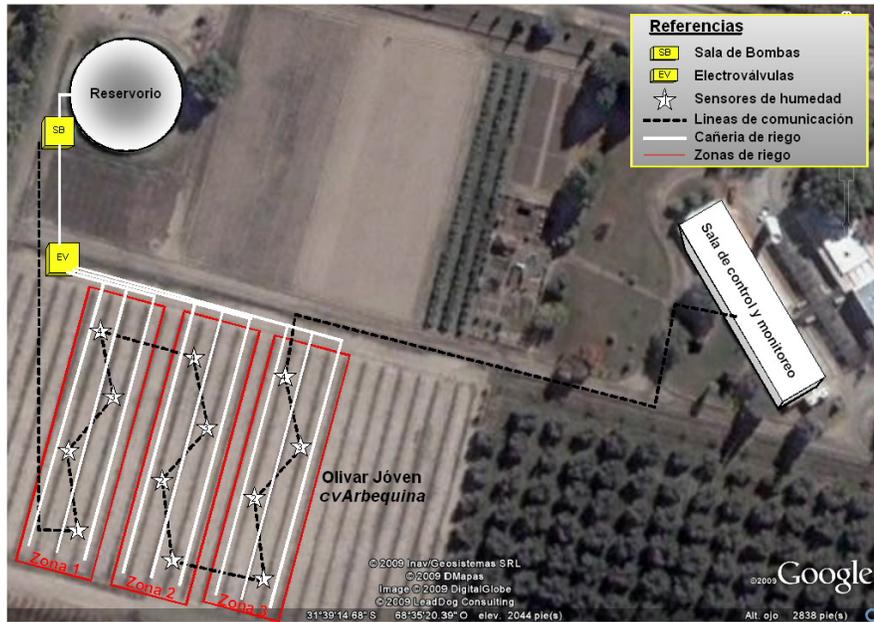


Figura 4. Vista aérea del lugar de experimentación en INTA - EEA San Juan. Se presenta la demarcación de tres parcelas, cada una de ellas contiene cuatro puntos de medición de humedad de suelo, y la ubicación espacial de los principales componentes instalados.

B- Sistema de control automático de riego basado en PC

En este trabajo se ha utilizado un sistema de monitorización y control desarrollado con anterioridad e implementado en los trabajos [12],[17],[18]. El sistema de control de riego estuvo basado en PC y se estructuró en tres unidades: (i) computadora de escritorio (PC), donde se ejecuta el programa informático (software), (ii) tablero de control, donde se encuentra el hardware requerido para accionar los actuadores al sistema de riego y (iii) arreglo de sensores y adaptación de señales (conversión A/D), con la cual se obtiene las mediciones de interés. En la Figura 5 se presenta un esquema del sistema propuesto.

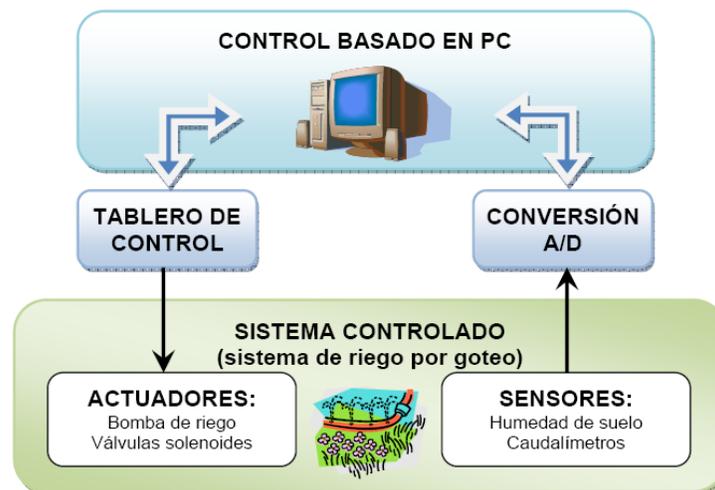


Figura 5. Sistema de monitorización y control automático de riego basado en PC.

Desde la PC, empleando una interfaz de usuario (HMI), se monitorizaron las variables de interés (Figura 6) y se controló el sistema de riego en los modos: control temporizado, control por histéresis y control inteligente (Figura 7). Tanto la monitorización como el control se efectúan en tiempo real en instantes de 3 minutos.

Cada zona de riego pudo ser controlada asignando un modo de control distinto, en este sentido, cada controlador fue mono-variable (una entrada - una salida) y operó independientemente en cada PAH. Esto permitió emplear distintas técnicas de control y/o efectuar estrategias de riego en cada zona de forma simultánea. En este trabajo se descarta la operación manual y tabulada por no tratarse de modos totalmente automatizados.

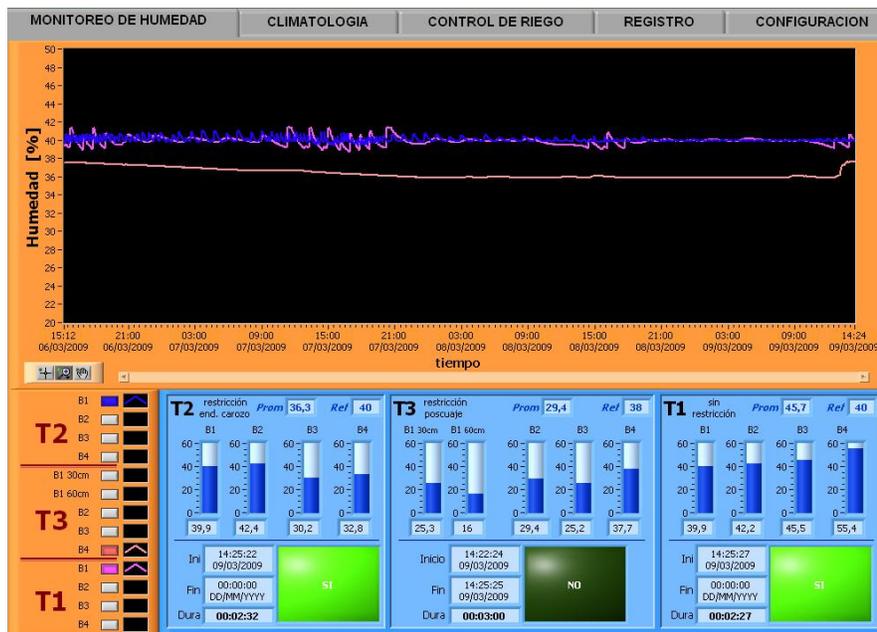


Figura 6. Interfaz de monitorización (en tiempo real) donde se presentan los niveles de humedad de suelo en cada punto de medición y la información referida de la última aplicación de riego ejecutada.

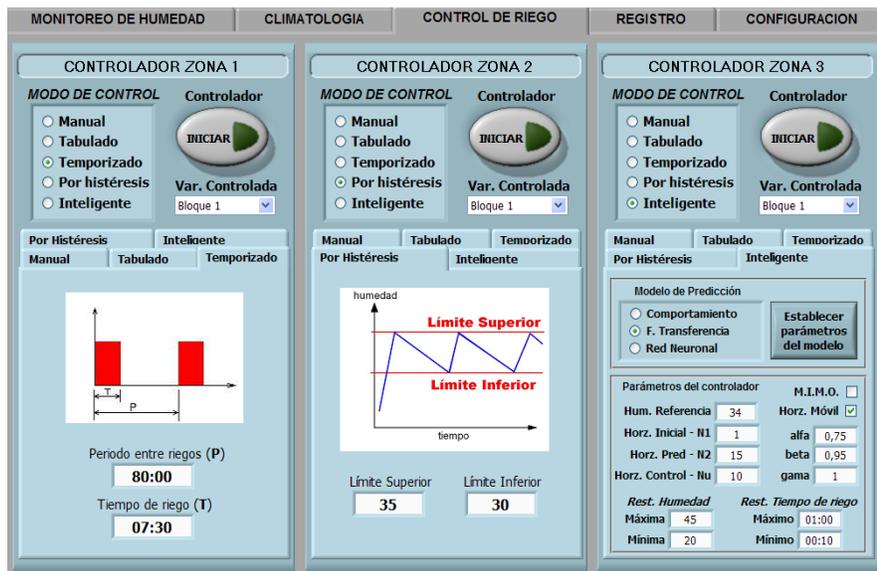


Figura 7. Interfaz de control automático de riego con diferentes modos de ejecución simultánea.

En la PAH1 se utilizó el modo de control temporizado. Se programó una secuencia de riego fija, de igual forma a la que operan los controladores comerciales. El ciclo se fijó en 60 horas entre riegos con la aplicación de 5 horas ($P=60h$; $T=5h$).

En la PAH 2 se utilizó el modo de control por histéresis. Se configuró al controlador a fin que el nivel de humedad de suelo permaneciera entre el 40% y 41%; por tanto, el ciclo de histéresis se estableció entre $Lim_{inf}=40\%$ y $Lim_{sup}=41\%$.

En la PAH 3 se implementó el modo de control inteligente. El controlador ha sido configurado para que la humedad del suelo se mantenga cercana al 40% (nivel de referencia). Particularmente en este modo, se ha utilizado como inteligencia computacional un algoritmo de control predictivo basado en modelo (CPBM) [17]. Según se indica en [19] el CPBM debe considerarse como un conjunto de métodos de control desarrollados en torno a: (i) predicción del comportamiento futuro del proceso suelo-cultivo-atmosfera-riego mediante el uso explícito de un modelo, (ii) las acciones de control, como ser la apertura de válvulas o encendido de bomba de riego, se determina por la minimización de un funcional de costo (función objetivo), y (iii) solo se ejecuta la primera secuencia de riego calculada en cada instante de muestreo (estrategia del horizonte móvil). En la Figura 8 se muestra en forma general la estructura de un controlador predictivo.

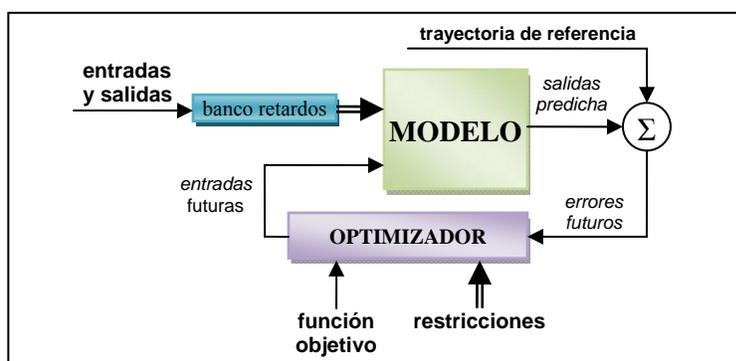


Figura 8. Estructura básica de un controlador CPBM

C- Metodología en la experimentación a campo

En primera instancia se ejecutaron experimentos a campo durante el periodo de tres semanas, ello con el fin de observar el comportamiento del sistema de control automático frente a los diferentes modos y sus respectivos parámetros. Estos experimentos permitieron el análisis y evaluación específica en cada modo de control.

Seguidamente, en las figuras 9, 10 y 11, se muestra la evolución de la humedad del suelo (línea roja) en cada PAH para cada modo de control, considerándose como punto de medición solo el bloque 1; también se grafica el estado de la válvula de riego (línea azul).

Posterior a los antes presentados, a fin de lograr el análisis comparativo de los tres modos de control, se realiza un nuevo experimento (once días de duración) ejecutándose los distintos modos de control de manera simultánea. En la Figura 12 se muestra la evolución de la humedad del suelo en cada PAH: en línea roja el modo de control inteligente (PAH 3); en línea azul el modo de control por histéresis (PAH 2) y en línea verde el controlador en modo temporizado (PAH 1).

En la Figura 13 se indica de manera gráfica la evolución en la cantidad de agua aportada en cada PAH (en forma acumulativa) durante la ejecución del experimento.

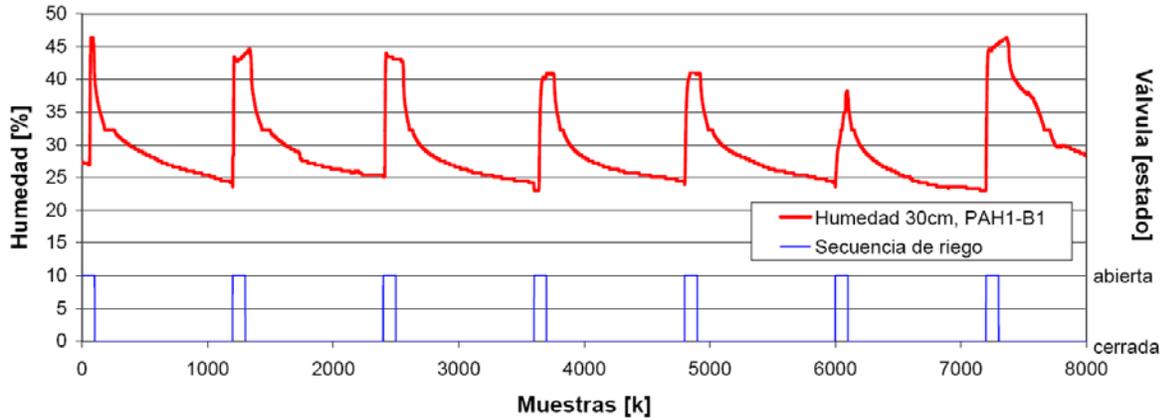


Figura 9. Variación de la humedad del suelo utilizando control temporizado. Secuencia de riego constante e inalterable (control a lazo abierto), cada 60 horas se regó 5hs (P=60h; T=5h).

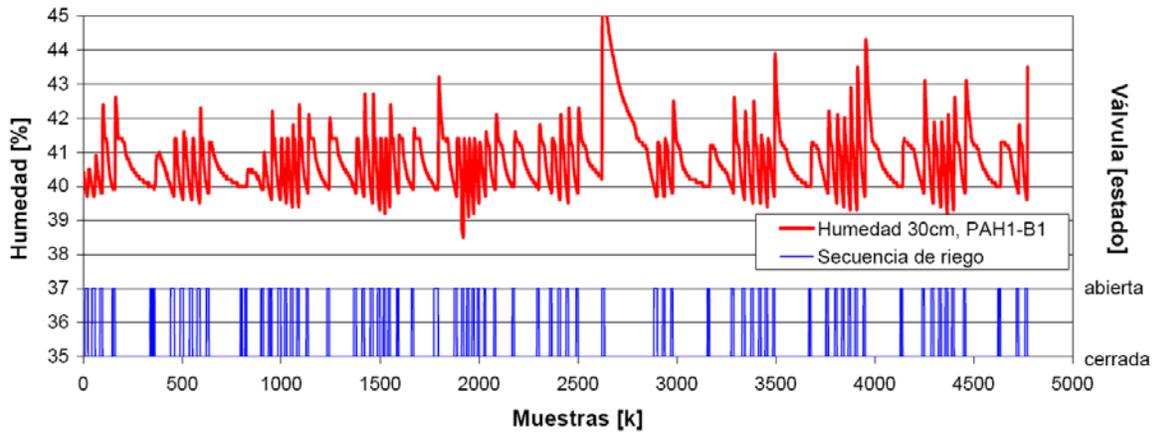


Figura 10. Variación de la humedad del suelo utilizando control por histéresis con ciclo de riego entre $Lim_{inf}=40\%$ y $Lim_{sup}=41\%$.

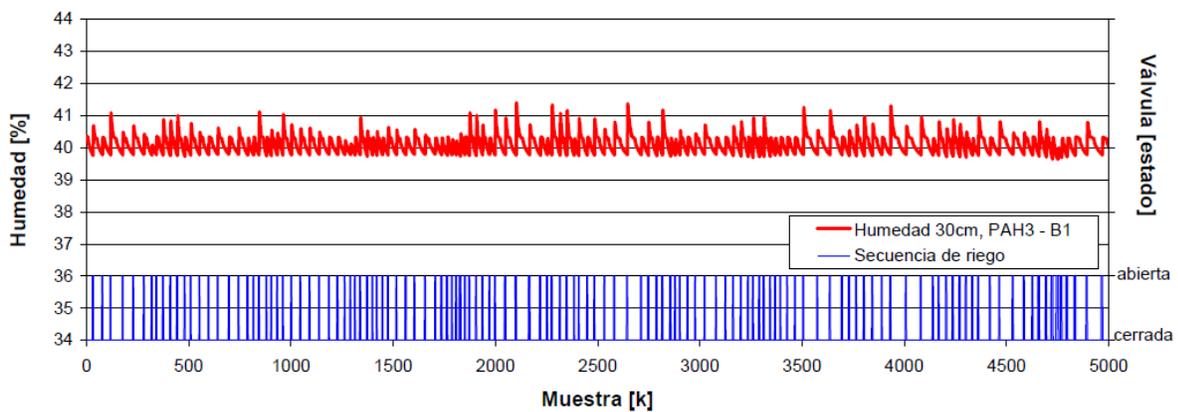


Figura 11. Variación de la humedad en el suelo empleando el control inteligente con referencia en 40%.

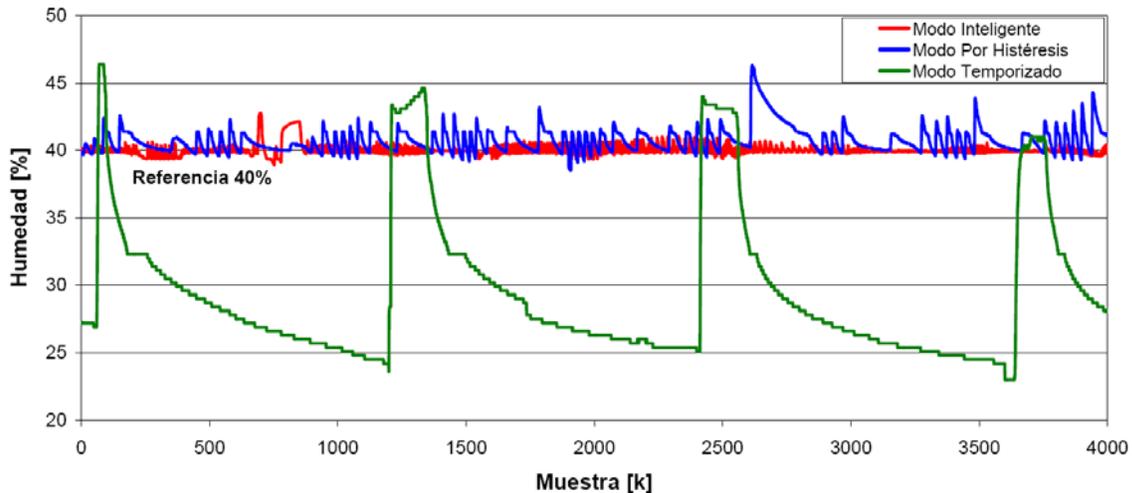


Figura 12. Variación de humedad del suelo durante la ejecución simultánea de tres modos de control automático: modo temporizado (PAH 1), modo por histéresis (PAH 2) y modo inteligente (PAH 3).

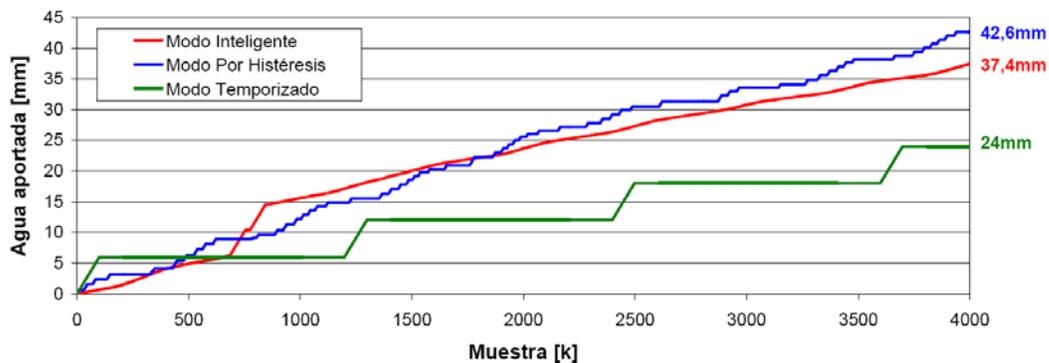


Figura 13. Agua aportada por el sistema de riego en cada PAH según el modo de control automático: modo temporizado (PAH 1), modo por histéresis (PAH 2) y modo inteligente (PAH 3).

III- Resultados y Discusión

Primeramente se analizan los tres primeros experimentos, los que correspondieron a la ejecución de cada modo de control automático en forma aislada.

En la Figura 9, donde se trabajó en el modo temporizado, recordando que éste es un modo de control a lazo abierto, se observa que la humedad ha variado en un amplio rango, permaneciendo en saturación en muchas de las aplicaciones de riego. Culminado el riego, la humedad desciende rápidamente, llegando al valor cercano de capacidad de campo. Dicha variación se da particularmente para este caso donde el ciclo de riego se repite cada 60hs (dos días y medio), tiempo en que se estima que la humedad del suelo alcanza el nivel de capacidad de campo luego de haberse saturado. Las aplicaciones de riego se efectuaron de igual forma, de manera sistemática, pero la respuesta en la variación del nivel de humedad se muestra diferente en cada aplicación de riego, esto se debe a que la demanda del cultivo (la cual está correlacionada con la evapotranspiración) es variable. De ello se deduce la principal desventaja de este modo de control, no puede ajustarse automáticamente la política de riego ante la demanda variable de agua por parte de los cultivos. Como ventaja se destaca el bajo costo de los controladores y fácil programación.

Luego de las entrevistas con los agricultores de la región, se notó que generalmente asignan aún mayores tiempos; ciclos entre 5 o 7 días con aplicaciones de 12 a 24hs. En estos casos la variación del nivel de humedad es mayor a la mostrada en la Figura 9. El suelo permanece saturado por más tiempo; de ello que las pérdidas por percolación son aún mayores y luego se llegan a valores de humedad cercanos al estrés hídrico. En consecuencia, la optimización del recurso es difícil de lograr bajo este modo de control.

En la Figura 10 se presentó la variación de humedad bajo el modo de control por histéresis. Si bien el propósito de este modo de control es mantener la humedad del suelo entre dos límites, puede observarse en la Figura que no ocurrió tal situación. En muchas de las aplicaciones de riego la humedad superó el límite establecido, como así también se observa que disminuyó por debajo del límite inferior; tales efectos se deben a que los retardos propios en la dinámica del suelo no son contemplados o incluidos en la ley de control. Sin embargo, se logró mantener la humedad del suelo en un determinado valor promedio con variaciones o desviaciones menores al caso anterior y se evitan los largos periodos de saturación del suelo.

Debido a que el riego se realiza “a demanda”, el controlador aplica el agua que fue consumida por el cultivo. En la Figura 10 se aprecia la variación en la dinámica de la humedad cuando es de día, donde hay mayor cantidad de aplicaciones de riego en respuesta a la demanda, y cuando es de noche con menores riegos. Como desventaja se observa la aplicación de riegos a muy alta frecuencia, lo cual no siempre es posible llevar adelante en instalaciones de gran porte. Además es necesario analizar la humedad del suelo a mayor profundidad a fin de no incurrir en un secamiento, ya que la alta frecuencia de riego disminuye la penetración o profundidad del bulbo húmedo.

En la Figura 11 se presentó la variación de humedad y el accionamiento de la válvula de riego al utilizarse el modo de control inteligente. Allí se observa que al inicio del experimento el controlador aplicó paulatinamente pequeñas cantidades de agua hasta alcanzar el nivel de referencia (40%); esto se debe a que la señal de referencia pasa por un filtro de primer orden en el algoritmo de CPBM con el objetivo de hacer más robusto el cálculo de las acciones de control frente a cambios bruscos en la referencia. Es importante destacar que, ante los otros modos de control, el riego consistió en aplicaciones de muy alta frecuencia, lográndose baja variabilidad en la humedad respecto a la referencia establecida.

En este modo de control se pudieron incorporar las restricciones físicas del sistema de riego para la optimización de los recursos. Esto es una gran ventaja cuando el sistema de riego cuenta con más de una zona ya que el algoritmo de control secuenciará el accionamiento de las válvulas de riego a fin de mantener la humedad en el nivel establecido optimizándose la cantidad de agua aplicada en forma total [17]. Como desventaja se presenta el problema de modelado (o configuración del modelo) que caracteriza la dinámica de la humedad del suelo. También se presenta la problemática que al aplicarse riegos de muy alta frecuencia puede ocasionarse el secamiento parcial del suelo en zonas más profundas lográndose un estrés en dicha zona y/o la exploración radicular del cultivo. Al igual que en el modo de control anteriormente analizado, el riego se aplica a demanda, por tanto en la gráfica 11 se aprecian diferencias en la frecuencia del riego cuando se produce la mayor demanda evaporativa (medio día) y cuando es el periodo nocturno.

En las Figuras 10 y 11 se presentan una porción de los experimentos a fin de observarse claramente el comportamiento de la humedad del suelo y del accionamiento de la válvula.

En referencia al experimento donde se ejecutaron los distintos modos de control en forma simultánea, Figuras 12 y 13, se presentan en la tabla 1 los resultados obtenidos. Se ha

indicado para cada modo de control la cantidad de veces que la válvula de riego pasó al estado de apertura, el tiempo total que permaneció abierta la válvula de riego, el tiempo total que permaneció encendida la bomba de riego, la cantidad total de agua aportada en cada PAH, el valor medio que consiguió la humedad del suelo y la máxima desviación ocurrida entre la humedad medida en el suelo respecto al valor de humedad de referencia.

Tabla 1. Resultados obtenidos al ejecutarse simultáneamente los tres modos de control de riego.

	Modo de control TEMPORIZADO	Modo de control POR HISTERESIS	Modo de control INTELIGENTE
PAH	1	2	3
Apertura de la válvula de riego	4 veces	60 veces	370 veces
Tiempo total en que la válvula permaneció abierta	1200 minutos	2133 minutos	1869 minutos
Tiempo de bomba de riego encendida	4539 minutos		
Agua total aportada	24mm	42.6mm	37,4mm
Valor medio de humedad del suelo	29,5%	40,7%	40%
Máxima desviación al nivel de referencia de 40% de humedad	17%	6,6%	2,8%

Analizando los resultados presentados en la tabla, junto a las figuras 12 y 13, desde el punto de vista del objetivo de control, se destaca el funcionamiento del controlador de riego en modo inteligente por mantener el valor de humedad cercano al nivel de referencia, con ello se observó la menor desviación y mayor eficiencia en el aporte de agua. Nótese que para lograr esto, el controlador debió aplicar riegos de muy alta frecuencia, abriéndose y cerrándose la válvula de riego mayor cantidad de veces que para los otros modos. Esto requiere especial atención al momento de seleccionar las válvulas de riego, ya que las mismas deberán ser de buena calidad y que permitan un alto número de operaciones.

En el modo de control temporizado se observó la menor aplicación de agua (24mm) pero a su vez con alta variabilidad en el valor de la humedad (mayor desviación respecto al nivel de referencia), donde se pasaba abruptamente de niveles bajos de humedad hacia la saturación. La aplicación de riego fue constante frente al consumo hídrico variable.

Comparando los dos modos de control realimentado, es decir entre el control inteligente y el control por histéresis, es importante destacar que en el primero las aplicaciones de riego fueron hechas en el momento oportuno, por tanto, se presenta el menor consumo de agua y la menor desviación; tales resultados son logrados gracias al empleo de un algoritmo de optimización y de predicción (CPBM).

Una forma de reducir aún más el consumo de agua es aplicar tratamientos de restricción hídrica en determinados momentos fenológicos del cultivo [20]. La restricción hídrica también es utilizada como una herramienta para lograr déficit hídrico controlado y así modificar las características de lo producido en el cultivo; en los últimos años esto se ha logrado en plantaciones de olivo [21] y vid [22]. Para dar aún mayor importancia al desarrollo de un sistema de monitorización y control de riego [18], particularmente empleándose un controlador inteligente, se han efectuado diferentes estrategias de riego deficitario en el monte de olivos ya presentado. Esto se consigue modificando el nivel de

humedad de referencia en los periodos convenientes [17]. De la aplicación de estos tratamientos, frente a un tratamiento testigo, se han observado diferencias significativas en la producción obtenida y en las características del aceite logrado [23][24].

IV- Conclusiones

En el noroeste argentino, particularmente en San Juan, se ha incrementado significativamente el área cultivada y para ello se han instalado sistemas de riego presurizado, mayormente por goteo. Se ha observado que en gran medida los sistemas de riego son manejados en forma manual, por tanto, la alta eficiencia en el uso del agua no siempre se logra, incluso puede llevar al fracaso del emprendimiento.

El agricultor planifica los riegos manuales basándose en datos históricos sobre velocidades de transpiración (medidas durante las anteriores temporadas del cultivo) y/o con un alto agregado de sensaciones subjetivas (o experiencia) al detectar signos de estrés o de exceso de agua en el suelo y en el cultivo.

En los grandes emprendimientos se automatiza la operación de riego empleando un controlador temporizado. La secuencia de riego se determina a fin de lograr un promedio en el nivel de humedad en el suelo y en base a datos históricos y/o la experiencia del regante, como se mencionó anteriormente. Con este modo de control se aplican grandes cantidades de agua a intervalos regulares pero largos, obteniéndose grandes variaciones en el nivel de humedad y, en caso de una programación errónea, altas pérdidas de agua por percolación.

Para mejorar el desempeño de controlador de riego deben incorporarse sensores que permitan obtener mediciones de interés y comandar el riego en base a ello. Con la implementación de los modos de control por histéresis e inteligente las necesidades de riego son medidas a intervalos frecuentes pero el agua solo es aplicada cuando se requiere.

Al incorporar el modo de control inteligente se ha reducido significativamente el aporte de agua. Este modo de control requiere una mayor inversión inicial en materia tecnológica (computador, sensores, transmisores, etc.) y luego en capacitación; pero que será recuperada al mejorar la eficiencia del sistema de riego y mejora productiva.

El control en modo inteligente permite implementar estrategias de riego deficitario controlado en determinados periodos fenológicos debido a la posibilidad de ajustar en forma precisa las dosis de riego para los diferentes niveles hídricos deseados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente con el apoyo y financiamiento del Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica del MiCTIP de la Nación y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). También un especial agradecimiento a los técnicos del Instituto de Automática (INAUT) y técnicos del INTA-EEA San Juan que colaboraron desinteresadamente en la puesta en marcha del sistema de monitorización y control de riego, y en la toma de muestras y mediciones a campo.

Referencias

- [1]- Consejo Federal de Inversiones - CFI (2008) "Plan estratégico olivícola argentino - PEOA2020"
- [2]- Corporación Vitivinícola Argentina - COVIAR (2003) "Plan estratégico Argentina vitivinícola - PEVI"
- [3]- "Relevamiento Agrícola en la Provincia de San Juan, ciclo 2006-2007". Departamento de Hidráulica. Gobierno de la Provincia de San Juan
- [4]- Marginet Campos J. L. (2000). "Aceite de oliva en la Argentina: Historia y futuro. Secretaria de agricultura, ganadería, pesca y alimentación". Dirección Nacional de Alimentos. Argentina.
- [5]- Charlesworth P. (2005). "Irrigation Insights No.1, Soil Water Monitoring". 2nd edition. Published by Land & Water Australia on behalf of the National Program for Sustainable Irrigation. Lismore. Australia

- [6]- Capraro F., Patiño D., Tosetti S., Schugurensky C. (2008). "Neural Network-Based Irrigation Control for Precision Agriculture". IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 357-362. China.
- [7]- Capraro F., Tosetti F., Vita Serman F. (2011) "Real-time soil moisture control for very high frequency drip irrigation in olive groves". Acta Horticulturae (ISHS) 888:239-246.
- [8]- Vita Serman F., Capraro F., Tosetti S., Olguín A., Bueno L., Cornejo V. (2008) "Intelligent irrigation control in olive groves (*olea europaea* L.): a novel approach for water resource optimization". VI International Symposium on Olive Growing, International Society for Horticultural Science (ISHS). Evora, Portugal.
- [9]- Vita Serman F., Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Capraro F., Carelli A. (2011). "Effect of different RDI strategies on productivity, quality and water use efficiency in a high-density Arbequina cv. olive orchard located in an arid region of Argentina". Acta Horticulturae (ISHS) 888:81-88.
- [10]- Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Vita Serman F., Capraro F. (2011). "Plant and soil water status behavior under different irrigation strategies in cultivar 'Arbequina' olive orchard". Acta Horticulturae (ISHS) 889:311-316.
- [11]- Kuo B. C., 1995. Automatic control systems. 7th Edition. Prentice Hall.
- [12]- Capraro F., Tosetti S., Vita Serman. 2010. Diseño de un laboratorio virtual y remoto para simular, monitorear y controlar un sistema de riego por goteo. Edición especial de "Laboratorios virtuales y remotos en Automática: Realizaciones y experiencias" Editores: Sebastián Dormido y Fernando Torres. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Vol 7(1), pp 73-84. 2010
- [13]- Howell T. A., 1996. Irrigation scheduling research and its impact on water use. En actas de International Conference Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE, pp. 21–33. San Antonio, Texas.
- [14]- Abraham N., Hema P. S., Saritha E.K., Subramannian S., 2000. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. Agric. Water Manag. 45. pp. 145–157.
- [15]- Capraro F., Schugurensky C., Vita F., Tosetti S., Lage A., Patiño D. 2008. Intelligent irrigation in grapevines: a way to obtain different wine characteristics. Proceedings 17th IFAC World Congress. Korea.
- [16]- Camacho E. y Bordons C. 1995. Model Predictive Control in the Industry Process. Springer Verlag, Spain.
- [17]- Capraro F., Tosetti S., Patiño H., Schugurensky C., Vita Serman F. 2009. Diseño y análisis de un controlador predictivo basado en modelo (CPBM) para el manejo inteligente de un sistema de riego por goteo. XIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, Santa Fe, ARGENTINA.
- [18]- Capraro F., Tosetti S., Vita F., Patiño D., Schugurensky C., Fullana R. (2008). Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (*olea europaea* L.) empleando LABVIEW. JII 2008, Jornadas de Informática Industrial, sesión Agroinformática. En marco de 37° JAIIO. Santa Fe, ARGENTINA.
- [19]- Camacho E. y Bordons C. (1995). Model Predictive Control in the Industry Process. Springer Verlag, Spain
- [20]- Fereres E y Soriano A. M. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany 58, 147-159.
- [21]- Moriana A., Pérez-López D., Gómez-Rico A., Salvador M. D., Olmedilla N., Ribas F., Fregapane G. (2007). Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. Agric. Water Management 87, 171–179
- [22]- Dry P.R., Loveys B.R., Mccarthy M.G., Stoll M. (2001). Strategic irrigation management in Australian vineyards. Jour. Int. des Sciences de la Vingen et du Vin 35: 129-139.
- [23]- Vita Serman F., Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Carelli A., Capraro F. (2011). Effect of regulated deficit irrigation strategies on productivity, quality and water use efficiency in a high-density 'Arbequina' olive orchard located in an arid region of Argentina". Acta Horticulturae (ISHS) 888:81-88.
- [24]- Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Vita Serman F., Capraro F. (2011). Plant and soil water status behavior under different irrigation strategies in cultivar 'Arbequina' olive orchard. Acta Horticulturae (ISHS) 889:311-316.

Datos de Contacto:

Dr. Ing. Flavio A. Capraro. Instituto de Automática, Fac. Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.
 Dirección: Av. Libertador San Martín 1109 (oeste), Ciudad Capital (CP5400), San Juan, ARGENTINA.
 Tel: +54-264-4213303. E-mail: fcapraro@inaut.unsj.edu.ar; fcapraro@gmail.com.