

Herramientas modernas de gestión en riego de precisión basadas en dispositivos electrónicos, programas informáticos y técnicas de control automático.

Capraro Flavio y Tosetti Santiago

Instituto de Automática (INAUT), UNSJ – CONICET, Av. Lib San Martín 1112 (o), CP5400, San Juan, Argentina

fcapraro@inaut.unsj.edu.ar; stosetti@inaut.unsj.edu.ar

Resumen. Los recientes avances y desarrollos en dispositivos electrónicos, sistemas de comunicación, programas y aplicaciones informáticas, técnicas de control automático, procesamiento de imágenes, vehículos no tripulados, entre otros más; juegan un rol importante en la modernización y tecnificación de la agricultura regional. En oposición del manejo tradicional de los campos o explotaciones agrícolas, hoy en día la agricultura de precisión requiere de la recopilación de datos y del procesamiento de la información en tiempo real a fin de identificar rápidamente los eventos sucedidos y conocer en detalle la variabilidad de las zonas cultivadas, todo ello con el objetivo de alcanzar la mayor productividad posible; acompañado del manejo y uso responsable de los recursos disponibles, especialmente del agua. En el trabajo se realiza una descripción de las nuevas tecnologías disponibles para la gestión de la agricultura de precisión, en particular enfocadas al “Riego de Precisión”. Se presenta un conjunto de desarrollos y experiencias realizadas en el Instituto de Automática durante los últimos años, como ser la implementación de sensores de humedad de suelo, estaciones de medición en campo, cuatriciclo robotizado, controladores de riego inteligente, y sistema web “Telemetría Agrícola”. Finalmente, se presentan dos casos de uso en la gestión de sistemas de riego presurizados para la realización de estrategias de Riego Deficitario Controlado (RDC) en olivos y en tomates con destino a industria, ambos casos en la provincia de San Juan.

Palabras claves: agroelectrónica, visión artificial, tiempo real

1 Introducción

El agua, elemento vital y recurso escaso, es uno de las principales limitantes sobre la producción agrícola en gran parte del mundo, particularmente en aquellos lugares donde las precipitaciones resultan escasas para cubrir las demandas hídricas de los cultivos, como lo es en la provincia de San Juan, Argentina. Según se enuncia en [1] *“con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables en todo el mundo y la creciente demanda de productos agrícolas, nunca antes ha sido tan*

apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua para la producción de cultivos, a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro y enfrentar las incertidumbres asociadas al cambio climático”.

En la República Argentina se estima que hay 174 millones de hectáreas cultivables (54% de la superficie total) de las cuales se encuentran cultivadas aproximadamente 40 millones (14% de la superficie total). Según los datos informados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [2], la extracción hídrica total nacional para el año 2011 alcanzó los 37.78 km³, de los cuales el 74 % fue utilizada para la producción agrícola, mientras que el 15% es para consumo humano y el 11% restante fue utilizado por el sector industrial. Estos datos indican la importancia del recurso hídrico como elemento primordial en el desarrollo agrícola del país.

De manera particular, en la provincia de San Juan, situada en la región noroeste de Argentina, la agricultura se desarrolla bajo características de clima árido-semiarido; las condiciones climáticas se caracterizan por las bajas precipitaciones que rondan los 90mm anuales. La ocurrencia de las precipitaciones es estival, concentrada entre los meses de diciembre y marzo, aunque la humedad relativa ambiental suele ser muy baja en ese periodo e inferior al 40% durante mayor tiempo del año. Las altas temperaturas medias y la baja humedad del aire resultan en una elevada evapotranspiración (ET₀) de los cultivos, alcanzándose niveles de consumos de hasta 1576 mm anuales [3].

De estos datos se deduce que casi la totalidad del consumo hídrico de los cultivos debe ser provisto mediante riego. Los huertos y fincas dependen del riego y la sustentabilidad productiva de los mismos requiere de un gran esfuerzo en el uso eficiente del agua que se destina al riego. Recientemente los productores agrícolas han debido incorporar e implementar nuevas tecnologías, como ser sistemas de riego presurizado (por goteo, por micro aspersión, sub-superficiales) que permiten lograr el aporte de agua localizada y controlada [4].

La incorporación de nuevas tecnologías para la aplicación del riego son de gran importancia, ya que la eficiencia en la localización del riego aumenta significativamente, alcanzando el 95% de rendimiento frente a los sistemas tradicionales de riego por gravedad que logran entre el 30 a 40%. Es importante complementar la eficiencia en la aplicación con la gestión de las operaciones de riego; ello implica definir adecuadamente y correctamente la programación del riego.

En la gestión tradicional de riego aún predomina el concepto de “riego uniforme”. En evolución a este concepto, se plantea un nuevo enfoque donde los sistemas de riego se diseñan en orden a lograr tratamientos de “riego diferenciado” teniendo presente las variaciones espaciales del campo, los requerimientos temporales en cada zona de manejo, y la disponibilidad de agua y energía, dando así el origen al “Riego de Precisión” (RP). Este concepto está en su etapa inicial, en la bibliografía ha adoptado múltiples formas, mencionándose como: “riego prescriptivo”, “riego a demanda”, “riego sitio específico”, “riego de tasa variable”, “riego inteligente”, entre otras más.

El RP no responde a una determinada tecnología, sino que es un enfoque sobre la gestión del riego a fin de realizar la aplicación de agua en un determinado lugar, en el momento requerido y con el volumen necesario con el objetivo de lograr la mayor producción de cultivos. La optimización y eficiencia productiva se logra a través de la recolección sistemática de datos; con el tratamiento de la información sobre lo que acontece en el cultivo, el clima y el campo; la gestión eficiente del riego y las tecnologías de aplicación del mismo; la detección de problemas en línea; las tecnologías de modelado sobre el sistema suelo-agua-planta-clima; y de técnicas de control automático. En [5] se resumen conceptualmente, “un sistema de riego preciso es aquel que sabe qué hacer, sabe cómo hacerlo, conoce lo que ha hecho, y aprende de lo que hizo”.

2 Métodos y materiales

La programación del riego en un cultivo se puede determinar por distintos métodos. La metodología mayormente utilizada es calcular el consumo de agua del cultivo (ETc) en base a la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET0) y el coeficiente de cultivo Kc ($ETc = ET0 * Kc$) [6]; una vez conocido el consumo luego se establece el tiempo de inicio y duración del riego a fin de reponer el agua consumida, ello se calcula en base a la disponibilidad de agua y a la cantidad de agua que aporta el sistema de riego. Otra forma de establecer el riego es mediante el control continuo del nivel de la humedad del suelo en la zona de mayor desarrollo de raíces efectivas del cultivo [7]; en este sentido la programación del riego se determina con el objetivo de mantener el nivel de la humedad constante y cercana a nivel de capacidad de campo. Otro enfoque es lograr el ajuste en la programación del riego según la medición de indicadores fisiológicos del cultivo (crecimiento del tronco o fruto, flujo de savia, temperatura del dosel vegetal, nivel de estrés hídrico, entre otros) [8-11], en este sentido, para efectuar el suministro de agua de forma óptima la planta en sí misma es el mejor indicador del estado hídrico del cultivo.

Como ya se ha indicado en la introducción, el desarrollo de la agricultura regional depende totalmente del riego, por ello el manejo eficiente es altamente requerido para superar las limitaciones en la disponibilidad de agua para riego y para expandir el área cultivada. Durante la última década, en el Instituto de Automática (INAUT), unidad de doble dependencia UNSJ y CONICET, se han realizado distintas investigaciones en el área de control automático, electrónica e informática con los cuales se han generado nuevos conocimientos y herramientas en vía de favorecer al adecuado manejo y gestión del riego. Seguidamente se realizará una descripción de las aplicaciones más relevante a RP.

En el año 2007 se concluyó el diseño de un prototipo de sensor de humedad de suelo tipo capacitivo (figura 1), con salida digital y conexión a una red serie RS-485. Con una red de dichos sensores se efectuaron las primeras experiencias de control de riego (a lazo cerrado) por medio de la medición continua de los niveles de humedad del suelo. Para esta fecha no había aún en el mercado un sensor de iguales características; por ello se tramitó y logró la patente de dicho dispositivo [12].

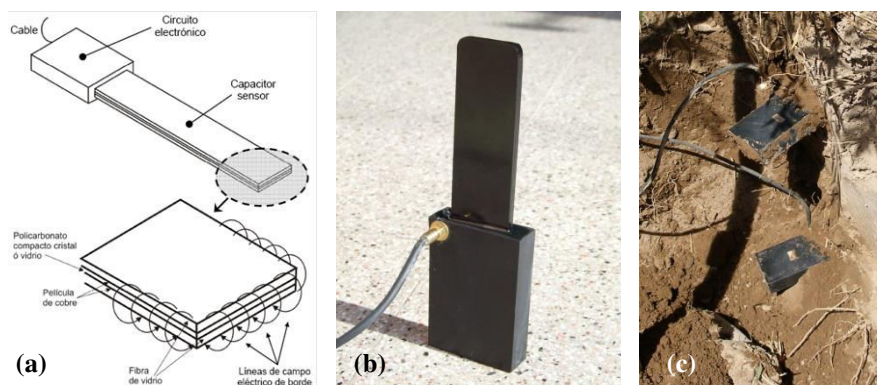


Fig. 1. Sensor de humedad de suelo tipo capacitivo. (a) Principio de funcionamiento del sensor. (b) Versión final del prototipo, (c) Calicata e instalación del sensor en la zona de las raíces efectivas del cultivo [12].

Los sensores fueron incorporados en un sistema de control automático de riego (a lazo cerrado). El controlador actúa sobre el accionamiento de la bomba y las válvulas de riego (figura 2.a) con el objetivo de mantener la humedad del suelo, en cada zona regada (figura 2.b), en un valor apropiado para cada etapa fenológica del cultivo. El desempeño de una red de sensores y el sistema de control se analizaron mediante la implementación a campo; para lo cual se instó el sistema en una explotación comercial de vides y en una explotación experimental de olivos [13].

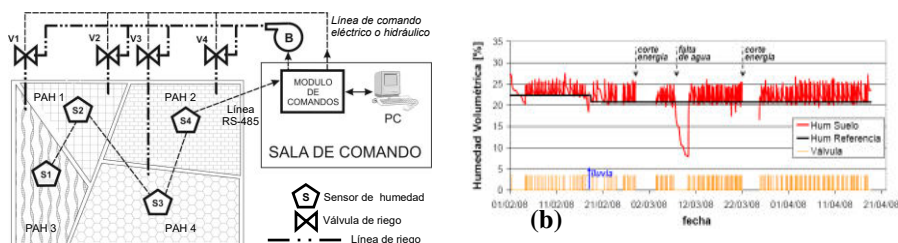


Fig. 2. (a) Esquema general del sistema de control de riego automático con realimentación de información de humedad del suelo. (b) Evolución de la humedad en la zona de raíces [13].

Luego de lograr la integración de los sensores con el sistema de control automático de riego se iniciaron investigaciones sobre las nuevas tecnologías en “Riego Inteligente” que comenzaban a surgir a nivel internacional. En orden a ello, se realizaron distintas propuestas de modelos matemáticos que permitieran caracterizar el comportamiento de la humedad del suelo ante los distintos eventos de riego. Con el desarrollo de los modelos dinámicos del suelo se logró la implementación de un controlador predictivo de riego basado en modelo de múltiples entradas (figura 3) [14].

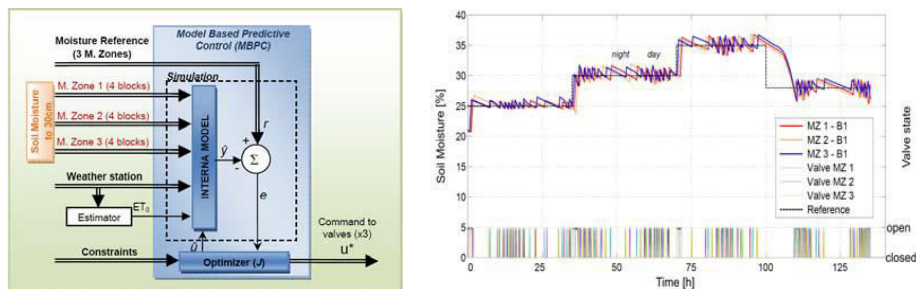


Fig. 3. (a) Esquema general del controlador predictivo de riego basado en un modelo dinámico del suelo. (b) Evolución de la humedad del suelo a 30cm de profundidad registrada en cuatro puntos de medición (bloques) dentro de una misma zona de cultivo [14].

El modelo matemático formulado permite estimar y predecir la variación temporal el agua en base al riego aplicado y al consumo del cultivo. Una serie de controladores junto al modelo matemático fueron integrados en una herramienta de simulación de riego (figura 4.a), diseñada en entorno gráfico. De esta manera se desarrollo un laboratorio virtual [15] para simular, monitorizar y controlar un sistema de riego por goteo. Con la herramienta el usuario puede ensayar distintas metodologías de riego según su conveniencia y posteriormente ser ejecutadas en el sistema real implementado en campo (figura 4.b).

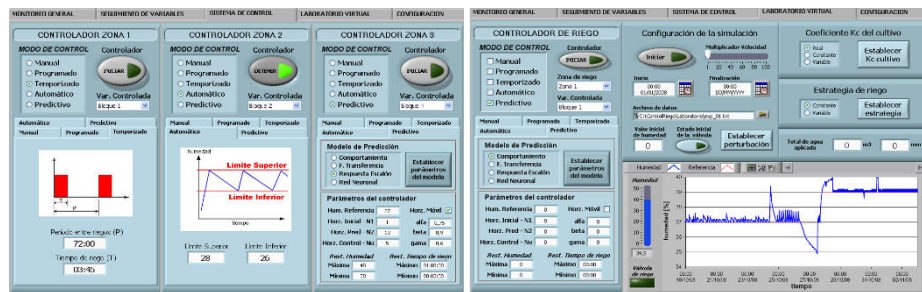


Fig. 4. Entorno de usuario de un laboratorio virtual para simular y controlar un equipo de riego por goteo. (a) Vista de los controladores de riego disponibles. (b) Entorno de virtualización.

2.1 Gestión de riego deficitario controlado (RDC)

Una metodología de gestión de las operaciones de riego válida para disminuir el consumo de agua es aportar menor cantidad de agua a lo requerido por el cultivo, causando temporalmente déficit hídrico en ciertos momentos del periodo fenológico. Esta estrategia conocida como “Riego Deficitario Controlado” (RDC), (en inglés: Regulated Deficit Irrigation - RDI) [16][17] ha sido objeto de trabajos de investigación de relevancia en olivicultura [18] [19] y vitivinicultura [20][21] de precisión. Tales investigación, no solo plantean el ahorro de agua como objetivo a fin

de campaña, sino también destacan que al implementarse estrategias de RDC en los instantes específicos del desarrollo del cultivo se logra el manejo controlado sobre el crecimiento de los cultivos (en especial si se trata de especies frutales), el control sobre determinadas características en los frutos a final de la campaña, y la diferenciación en atributos (contenido de polifenoles, nivel de oxidación, materia grasa, brix, etc.) de los productos finales, como ser en los aceite o vinos resultantes [22][23].

Si se tiene nuevamente presente las condiciones de clima de la provincia de San Juan, donde el desarrollo de la agricultura depende totalmente de la aplicación del riego durante toda la campaña; se puede considerar como una ventaja la posibilidad de controlar el desarrollo del cultivo (de manera extensiva) mediante la gestión del riego bajo la implementación de técnicas adecuadas de RDC, a fin de influir positivamente en la calidad del producto final.

La implementación de RDC solo se realiza en breves momentos de la campaña, lo cual depende de cada cultivo y sensibilidad del riego en cada fase de desarrollo. Para que sean exitosos los resultados se requiere conocer de manera precisa el consumo hídrico del cultivo y, a su vez, efectuar el seguimiento continuo de la variación del contenido de humedad en el suelo y del desarrollo del cultivo; ello a fin de no provocar un déficit excesivo (tanto en duración como en intensidad) que perjudique al cultivo de manera irreversible.

Utilizando los desarrollos hasta el momento presentados, se iniciaron distintas investigaciones sobre la aplicación de tratamientos de RDC en olivos, basados en la medición de la humedad del suelo y la implementación en campo de los controladores de riego inteligentes [24]. Los ensayos en campo se realizaron en un monte de olivos cv. Arbequina, de plantación es intensivo de 6m x 2m, situado en la estación experimental INTA-San Juan (31°39'14.13"S 68°35'15.94"O). Se consideró un cuadro de 6 hileras con 30 plantas cada una (figura 5). El perfil de suelo es uniforme, se 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, en cada una se consideraron cuatro bloques de medición de humedad de suelo con señores a 30cm y 60cm de profundidad.



Fig. 5. 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.

Se montó un sistema de riego por goteo con emisores auto-compensados de 2 litros/hora, distanciados a 80cm. La línea principal de riego se divide en tres sectores, uno para cada zona; a tal fin, se instalaron tres electroválvulas solenoides que permitieron regar de forma independiente cada zona. La cantidad de agua aplicada fue registrada continuamente por caudalímetros digitales.

El sistema de control de riego estuvo basado en PC (figura 6) 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.

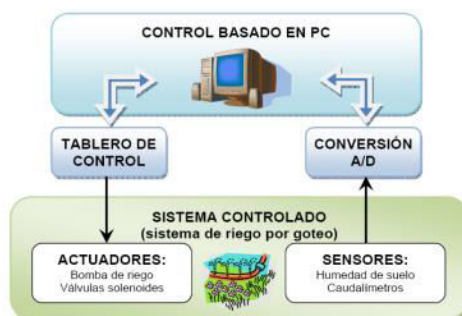


Fig. 6. Sistema de monitorización y control automático de riego basado en PC.

Desde la PC, empleando una interfaz de usuario (figura 7), se monitorizaron las variables de interés y se controló el sistema de riego en los modos: control “temporizado”, control por “histéresis” y control “inteligente”. En el último modo, se implementaron las estrategias de RDC ajustando en forma precisa las dosis de riego para los diferentes niveles hídricos deseados.

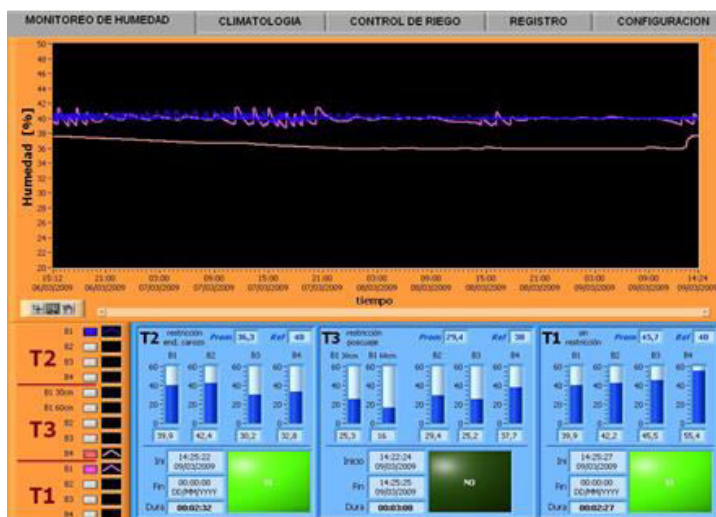


Fig. 7. Interfase de usuario donde se logra la monitorización de los niveles de humedad de suelo en cada punto de medición y aplicación de las operaciones de riego.

El sistema de monitorización de humedad de suelo y controlador (basado en PC) del sistema de riego se utilizaron para llevar adelante un ensayo de RDC en olivos. Tres tratamientos diferentes de riego fueron aplicados durante dos temporadas, definidos de la siguiente manera; T3: RDC desde el inicio de floración hasta la cosecha; T2: RDC desde la fase de endurecimiento de carozo hasta la cosecha; y T1 totalmente regado (100% ETc) como tratamiento control. En los tratamientos T2 y T3, en la primera temporada la reducción fue del 40% mientras que en la segunda fue de 30% del nivel de capacidad de campo del suelo.

En los trabajos [25] y [26] se han presentado los resultados alcanzados a final de la investigación sobre la aplicación de RDC. Como resumen, en la tabla 1 se muestra una comparación de la cantidad de agua aplicada en cada tratamiento y el nivel de eficiencia en el uso del agua. En la primera campaña la cantidad de agua se redujo el 58% en T2 y 67% en T3 frente al agua aplicada en el tratamiento control. Mientras que en la segunda campana la cantidad de agua aplicada se redujo 30% en T2 y 62.5% en T3. La eficiencia del uso de agua, esto es la cantidad de Kg cosechados a fin de campaña por mm de agua aplicada por riego, fue mayor en los tratamientos donde se redujo el riego, no presentándose variaciones significativas entre los tratamientos de restricción T2 y T3.

En relación al aceite obtenido, se analizaron las características de los mismos, y se observó la influencia de provocar estrés hídrico en determinados momentos. En las mediciones se observaron que el ácido oleico, el contenido de fenoles y tocofenones totales, el coeficiente MUFA/PUFA y el índice de estabilidad oxidativa (OSI) se vieron incrementados en los tratamientos de RDC, especialmente en la primera campaña [25]. Durante los ensayos, se realizaron mediciones de potencial hídrico en las plantas, en donde también se observó la sensibilidad del cultivo al momento de restringir la lámina de riego [26].

Table 1. Tamaños de fuente para los encabezados.

Tratamiento	Campaña 2007/08		Campaña 2008/09	
	Agua aplicada (mm)	Eficiencia uso de agua	Agua aplicada (mm)	Eficiencia uso de agua
T1	786.1	1.32	853.3	1.85
T2	616.0	1.49	707.6	2.11
T3	583.9	1.8	558.8	2.1

Destacar de la tecnología implementada, que se logró desarrollar una herramienta que permitió llevar adelante tratamientos de riego con alta precisión y efectividad en cada operación de riego; debido a que el controlador de riego calculó y aplicó la cantidad de agua requerida para mantener el nivel de humedad del suelo dentro de los valores requeridos con el objetivo principal de lograr que los tratamientos de riego se realizaran de manera estable y constante durante el periodo de tiempo establecido.

2.2 Telemetría y riego de precisión

En el año 2014, el término de Riego de Precisión resonó con mucho ímpetu en la provincia de San Juan por atravesar una de las peores crisis hídricas de la provincia. La falta de disponibilidad de agua para el sector agrícola, debido principalmente a la pobre acumulación de nieve de alta cordillera y de agua en los diques, afectó significativamente al sector. La eficiencia en la distribución y aplicación del riego fue altamente requerida, como así también la instalación de sistemas de riego presurizado que favorecieran a aumentar el rendimiento de la aplicación del riego.

En dicho contexto, se detectó la necesidad de desarrollar y poner a disposición de los productores una serie de herramientas tecnológicas robustas y estables que ayuden a tomar decisiones acertadas y con menor margen de error posible sobre el manejo de los sistemas de riego. El objetivo buscado por los productores locales es lograr la correcta aplicación de los tratamientos de riego, favorecer el ahorro de agua, fertilizantes y energía; y mejorar el producto final en calidad y cantidad, para mejorar la competitividad, rentabilidad y sustentabilidad del negocio.

En atención a la demanda tecnológica el sector agrícola, para llevar adelante una agricultura moderna y para lograr el manejo eficiente del riego, se planteó el desarrollo de un sistema de medición y monitorización de variables (intra campo) que se adecúe a la realidad local y que permita conocer en tiempo real la evolución de los

cultivos, el funcionamiento de los equipos de riego y las condiciones climáticas que afectan a la zona cultivada.

El desarrollo del sistema se basó en el análisis de la infraestructura de manejo de los datos y la monitorización de la información bajo las técnicas modernas de telemetría, denominado “Telemetría Agrícola” [27]. En la figura 8 se presenta un diagrama en donde se han integrado diferentes dispositivos electrónicos, de comunicación, robótica e informática a fin de lograr la monitorización y supervisión de variables de interés en el campo y de los equipos de riego.

La telemetría es una técnica moderna que permite la recopilación de datos a grandes distancias de manera que se logra obtener información precisa sobre un elemento remoto. Hoy en día, la telemetría es una herramienta muy difundida porque permite la recolección de información de manera inalámbrica, lo que posibilita llevar adelante acciones de manejo de instrumentos, equipamiento, o procesos de forma remota.

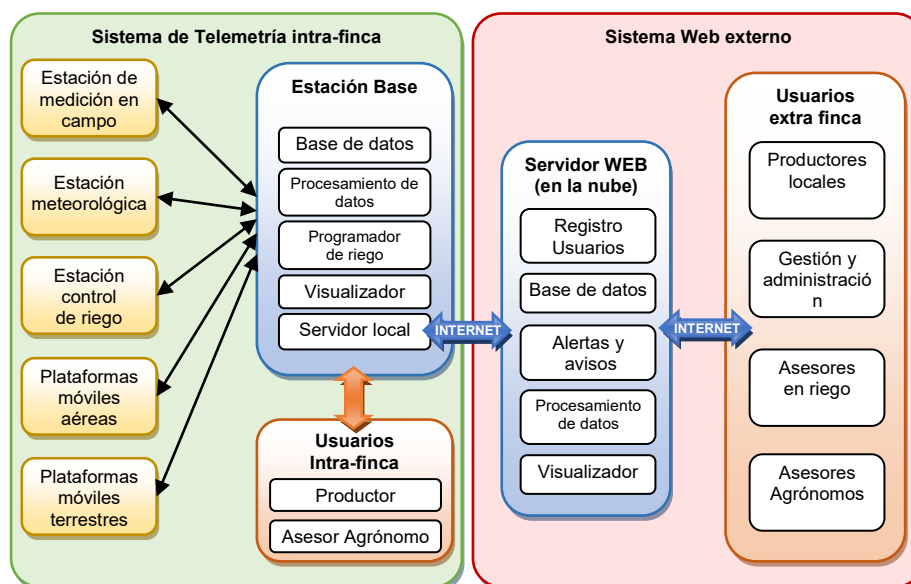


Fig. 8. Esquema del sistema de Telemetría Agrícola (intra-finca) en combinación al sistema web externo que permite el acceso vía internet a la información de la finca o predio.

El sistema de telemetría se ha subdividido en seis componentes, los cuales se detallan a continuación.

2.2.1 Estaciones de medición estáticas

Comprende una serie de estaciones de medición (figura 9) instaladas en campo en un determinado lugar dentro de la zona cultivada. Realizan la medición y registro sitio

específica de una serie de variables a fin de conocer lo que allí sucede. Hay tres tipos de estaciones de medición estáticas:

i) *Estación de medición en campo.* Se cuenta con sensores de humedad de suelo (suele instalarse tres sensores a diferentes profundidades), temperatura y conductividad del suelo, presión matricial en el suelo, temperatura y humedad ambiente, presión en el lateral de riego. El desarrollo de la estación de medición (figura 9.a) está basado en el uso de microcontroladores de bajo consumo y con sistema de alimentación por energía solar.

ii) *Estación meteorológica.* La estación está equipada con una serie de sensores que permiten medir las variables climáticas (figura 9.b). La estación integrada es el modelo Vantage ProII, de la firma Davis.

iii) *Estación de control y monitoreo de riego.* La estación está equipada con una serie de sensores para conocer el caudal de agua aportada y de la presión en los sectores de riego (figura 9.c), lo cual permiten conocer el estado de funcionamiento de los equipos de riego presurizados. A diferencia de las otras dos estaciones, en ésta se puede realizar acciones de control sobre el sistema de riego (figura 9.d); de esta manera se logra automatizar las operaciones de riego mediante el accionamiento de las electroválvulas destinada a cada sector de riego, las aplicaciones de inyección de fertilizante, y las tareas de retro-lavado y limpieza de los filtros.

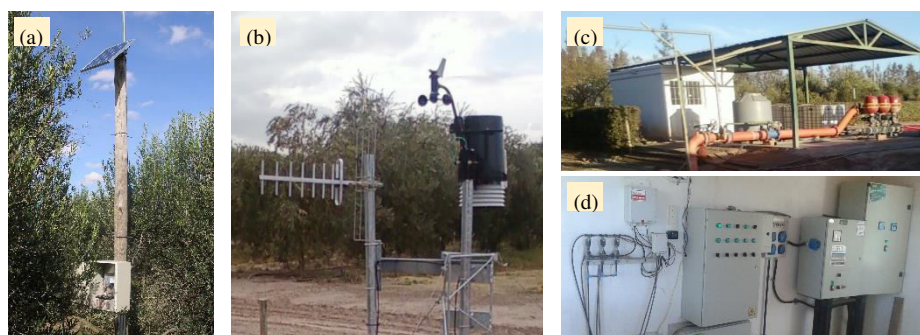


Fig. 9. Conjunto de estaciones en campo. (a) Estación de medición de variables dentro de la zona cultivada. (b) Estación meteorológica entro del predio. (c) Cabezal del sistema de riego presurizado. (d) Unidad de control remoto del sistema de riego por goteo.

2.2.2 Estaciones de medición móviles

Las estaciones móviles permiten complementar la información que se obtiene desde las estaciones de medición fijas. El diseño de las estaciones móviles se basa en el uso de plataformas móviles aéreas y terrestres no tripuladas, según se detalla:

i) *Cuatriciclo robotizado.* Consiste en un cuatriciclo comercial 250cc al cual fueron automatizadas las acciones de dirección, aceleración y frenado para el uso agrícola [28] (figura 10); lográndose desarrollar una plataforma terrestre que recorre la zona cultivada de manera autónoma [29]. El control de navegación se basa en el uso de un

sistema GPS diferencial y de visión estéreo. En el cuatriciclo se han montado dos sistemas de escaneo laser (LIDAR) (figura 10.b), una cámara termográfica, y una cámara multispectral; todo el instrumental permite obtener información de los cultivos, en particular de los laterales del cultivo, con lo cual se puede analizar la estructura foliar [30] (figura 10.c), entre otros parámetros.

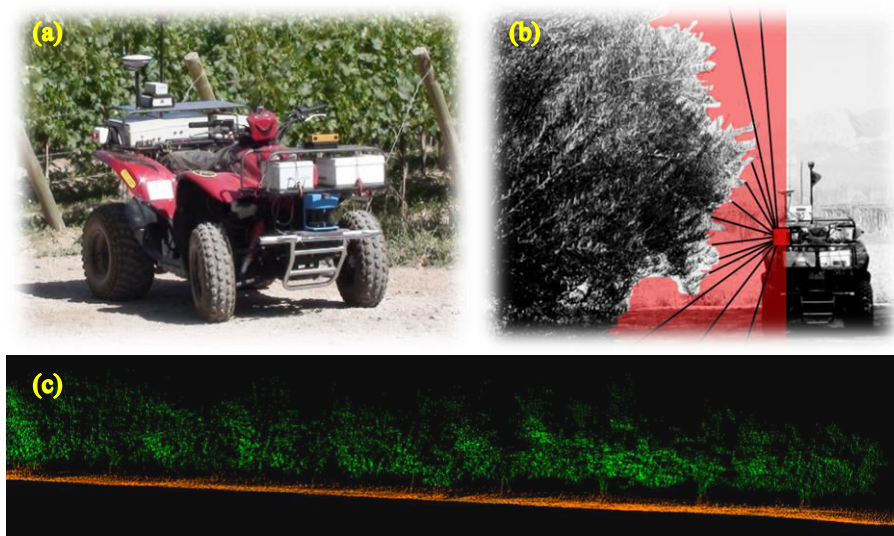


Fig. 10. Cuatriciclo robotizado. (a) Conducción autónoma del vehículo utilizado para la inspección de los cultivos. (b) Mapeo con el escaner LIDAR de una planta de olivo. (c) Reconstrucción tridimensional de una fila de olivos.

ii) Cuatrirrotor autónomo: Consiste en el uso de una plataforma aérea del tipo cuatrirrotor, modelo Solo, de la firma 3DR Robotics (figura 11). A la plataforma aérea se ha montado una cámara termográfica Flir VueProR 640 y una cámara multispectral RedEdge de Micasence; ambas se utilizan para obtener las imágenes desde el plano superior al cultivo [31]. Las imágenes son procesadas a fin de obtener información necesaria para determinar las zonas donde el cultivo se encuentra bajo estrés hídrico a fin de corregir el programa de riego y/o de verificar el estado de funcionamiento del sistema de riego en dicha zona [32].

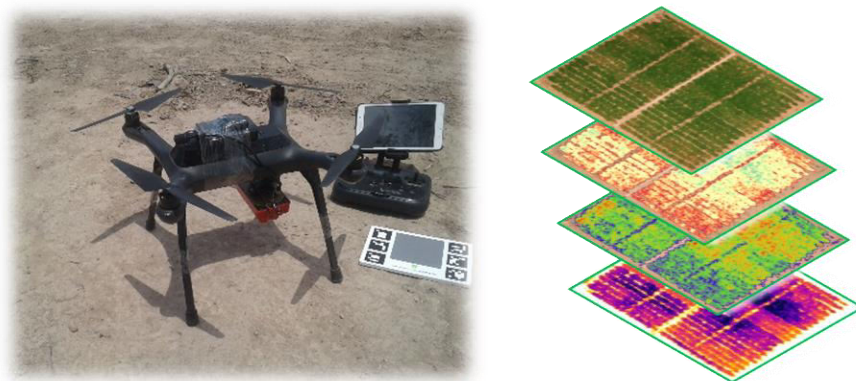


Fig. 11. Cuatrirroto Solo e imágenes obtenidas con cámara multispectral y termográfica.

Desde el sistema de telemetría se logra observar el estado de funcionamiento y el recorrido que realizan las dos plataformas móviles dentro del predio; los análisis de las fotografías obtenidas con las cámaras termográficas y multispectrales, y los datos del escáner laser se efectúan fuera de línea; cuando la plataforma llega a destino se descargan los datos al servidor local para su procesamiento y análisis.

2.2.3 Sistema de monitorización y control de riego

Este subsistema está conformado por una serie de programas y algoritmos informáticos que logran monitorizar, evaluar y establecer las operaciones de riego que se deben ejecutar. Los tiempos de inicio y duración de cada turno de riego son definidos por el usuario; el sistema tiene la capacidad de informar la demanda hídrica de los cultivos a partir del último riego, la cual se calcula en base a la estimación de la ET0 y según la variabilidad de humedad en el suelo. La información registrada (figura 12.a) es importante en orden a realizar riegos de precisión ya que el usuario conoce con exactitud la demanda de agua y podrá reponer con el riego la

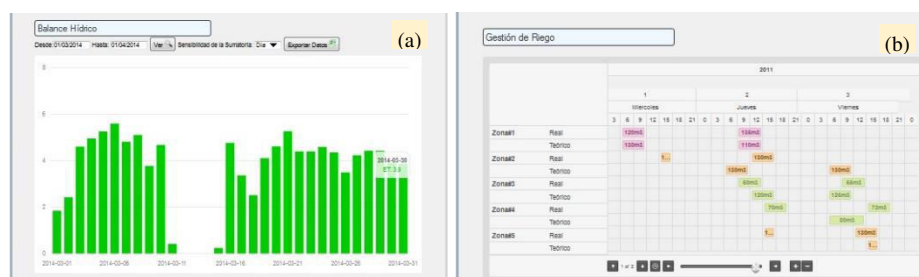


Fig. 12. Sistema de monitorización y control de riego. (a) Registros diarios de la estimación de ET0. (b) Plantilla de programación y ordenamiento de las operaciones de riego

cantidad necesaria para cubrir el déficit o pérdida. El programa también permite el ordenamiento de los turnos de riego y la programación de cada operación (figura 12.b) con el objetivo de automatizar el control del sistema de riego y fertilizantes.

2.2.4 Sistema de gestión de datos

Este subsistema cumple una función fundamental en el sistema de Telemetría Agrícola, ya que es el encargado de coordinar cada nodo dentro de la red de datos para así lograr la transmisión de la información entre la estación base y cada estación fija o móvil dentro del predio. También el subsistema se encarga de analizar los datos a fin de generar eventos que permiten gestionar de forma óptima la transacción y lograr el mantenimiento automatizado del sistema de datos. El subsistema se conforma de cuatro unidades: i) Módulos de comunicación inalámbricos. ii) Módulo coordinador y de transacción de datos. iii) Servidor de eventos. iv) Servidor de datos.

2.2.5 Sistema de procesamiento de la información

El subsistema contiene todos los programas y algoritmos requeridos para el procesamiento de la información que se obtiene desde las estaciones de medición. Entre los algoritmos se encuentran: estimación de parámetros del sistema de riego y detección de fallas en tiempo real (figura 13.a); módulo de programación de turnos de riego, modelos de estimación de evapotranspiración de referencia ET_0 y cálculo acumulativo de la demanda hídrica de los cultivos (diario, mensual y anual); algoritmo de análisis de balance hídrico en el suelo; algoritmo de pronóstico sobre la ocurrencia de heladas y viento Zonda; y algoritmos de fusión sensorial para la generación de índices sobre el estado del cultivo (estrés hídrico, enfermedades, NDVI) (figura 13.b).

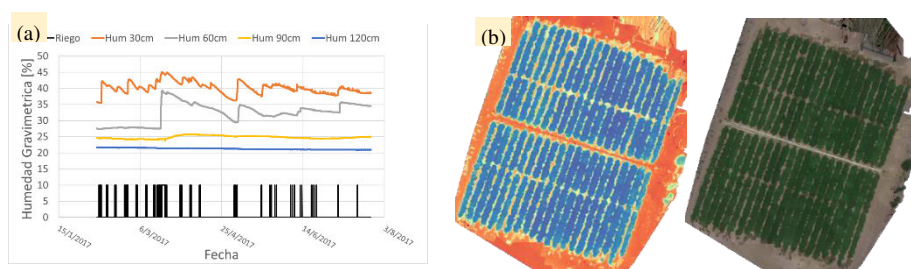


Fig. 13. Sistema de procesamiento de la información. (a) Registro temporal de la evolución de la humedad en el suelo y riego aplicado en una parcela. (b) Análisis de un cultivo utilizando imágenes multiespectrales (NDVI y RGB).

2.2.6 Sistema de interfase al usuario

Consiste de una interfase de visualización (figura 14) que permita a los productores acceder a toda la información del sistema de Telemetría Agrícola de forma sencilla a

fin de interpretar lo sucedido en el cultivar o equipo de riego y tomar decisiones certeras sobre la programación del riego. El sistema de visualización está montado en un servidor local. De igual manera puede ser consultado desde el exterior del predio o finca.

Los usuarios deben estar registrados en la plataforma de Telemetría Agrícola y solo acceden a información pública (por ejemplo, pronóstico de heladas y viento Zonda, nivel de ET0, condiciones climáticas, entre otros) como así también pueden solicitar el envío de avisos ante determinados eventos climáticos (registro de temperaturas mínimas, lluvias, vientos, etc.).

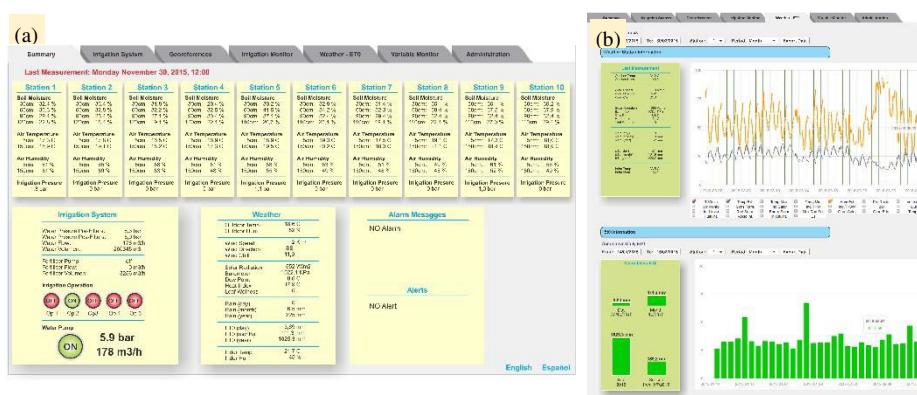


Fig. 14. Sistema de interfase al usuario. (a) Pantalla de resumen de variables y parámetros en la finca. (b) Pantalla de visualización de las variables climáticas y registros diarios de la ET0.

El sistema externo le brinda mayor funcionalidad al sistema de telemetría en orden a que los productores pueden ser asesorados (sobre la gestión eficiente del riego, temas de agronomía y/o problemas por contingencias climáticas) de manera rápida por otros profesionales o colegas sin la necesidad de concurrir a la zona cultivada, basándose en la información registrada.

3 Casos de uso y resultados recientes

El primer desarrollo de sistema de monitorización y control de riego que alcanzó la fase de prototipo se denominó “Multiplataforma Riego Preciso” [33]; este desarrollo se efectuó entre los años 2013 al 2016. La multiplataforma es un desarrollo informático basado en formato web que permite la monitorización de variables dentro de una explotación agrícola (ej. humedad de suelo, valor de las variables climáticas, cantidad de agua aportada en cada sector, el estado del equipo de riego, etc.) y el manejo remoto de los equipos de riegos y fertilización.

Para validar el desempeño del sistema y sus módulos se realizó una experiencia piloto en un olivar comercial de 90hs (figura 15), ubicado en región sur de la provincia de San Juan [34], lugar donde predomina el desarrollo olivícola.

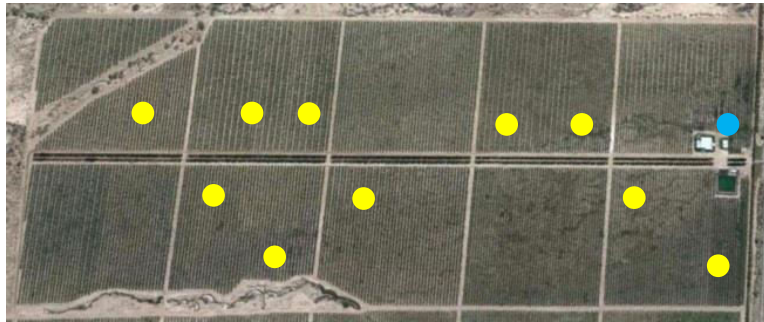


Fig. 15. Fotografía aérea del olivar de 90 hectáreas, dividido en diez cuadros. Coordenadas geográficas 32° 2' Sur, 68° 32' Oeste, 620m del nivel del mar (fuente: Google Earth)

En el predio se han instalado 10 estaciones de medición de humedad de suelo de manera de combinar los turnos de riego, la variedad de olivar y el perfil de suelo (indicadas con círculos amarillos en la figura 15). En cada estación se instalaron cuatro sensores de humedad de suelo a 30cm, 60cm, 90cm y 110cm de profundidad. Las variables climáticas se obtienen de la estación meteorológica automática ubicada en cercanías del cultivar (indicadas con círculo celeste en la figura 15). Se cuenta con un sistema de riego por goteo permite regar cuatro zonas de riego; cada cuadro de olivo esta dividido en dos unidades de riego (20 unidades de riego en total), que por lo cual se requieren cinco operaciones para abastecer a toda la finca.

Seguidamente se presenta resúmenes de información que el usuario puede visualizar en la plataforma. En las figuras 16 y 17 se muestra información referida a la ET0 y en nivel de precipitaciones; dicha información es de importancia (para el usuario o encargado del riego) al momento de calcular los tiempos de la programación del riego, debido a que el sistema de riego deberá suministrar la demanda de agua requerida.

El registro continuo de la humedad del suelo y la monitorización de la variación a cada profundidad (figura 18) permite al usuario efectuar los ajustes necesarios sobre los tiempos de programación de cada operación de riego a fin de mantener el

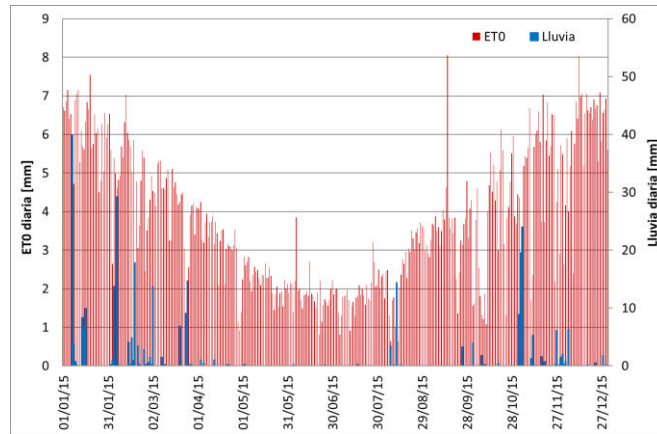


Fig. 16. Nivel de ETO y precipitación por día registrados en el predio (año 2015)

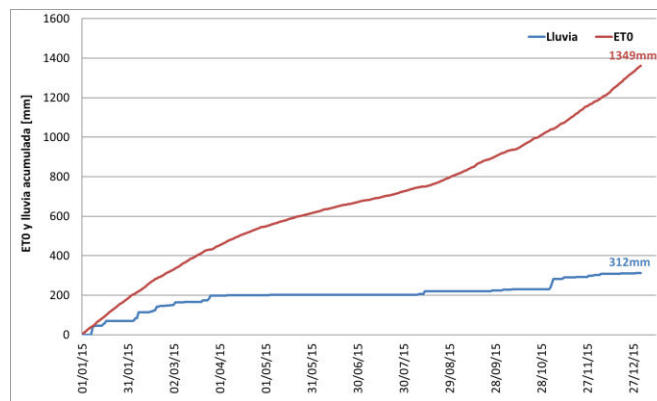


Fig. 17. Nivel acumulado de ETO y precipitación registrados en el predio (año 2015)

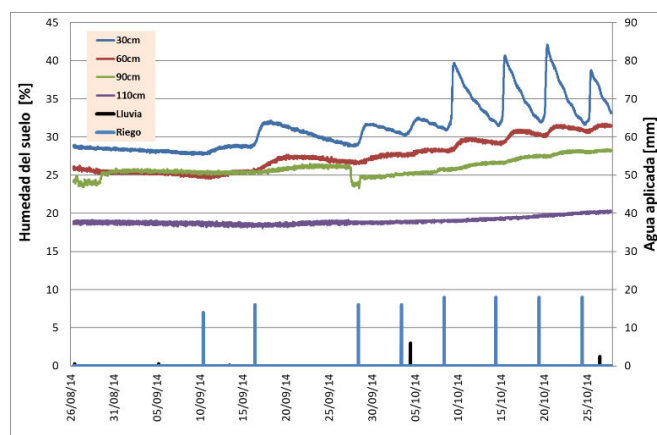


Fig. 18. Evolución de la humedad del suelo a distintas profundidades y riego.

nivel de humedad dentro de los niveles óptimos (esto es cercano al nivel de capacidad de campo del suelo) en la zona de raíces del cultivo (entre 30 a 100cm para el caso del olivo). Al mismo tiempo se requiere que el nivel de humedad en la zona profunda (110cm) no se modifique sustancialmente, lo cual indica que no hay pérdida de agua por percolación; que generalmente ocurre por exceso en la aplicación de riego.

En la figura 18 se observa la variación de humedad en una de las estaciones de medición. En líneas continuas se grafica el nivel de humedad a cada profundidad (registrado por cada sensor de humedad de suelo) y en barras verticales se indican las aplicaciones de cada riego y el aporte por precipitación. En el caso de las lluvias puede observarse que la humedad del suelo no es afectada, ello se debe a las características del suelo y clima donde por lo general las lluvias no son efectivas.

Es conveniente hacer una breve discusión sobre el uso del sistema de control de riego frente a lo sucedido en dos campañas. Durante la campaña 2014-15 el sistema solo se utilizó para monitorizar el funcionamiento del equipo de riego y los niveles de humedad en cada estación de medición, las operaciones de riego fueron definidas por el operario de riego en base a la experiencia adquirida de campañas anteriores y cada operación se ejecutaba accionando las válvulas de riego en modo manual. De manera distinta, en la campaña 2015-16 las operaciones de riego se definieron en base a toda la información que el sistema registraba, particularmente la estimación de ET0. Con dicho valor y el coeficiente de cultivo ($K_c=0.55$) se determinó el consumo del cultivo ETc [35]. Obtenido el ETc, luego se definen las operaciones de riego y la cantidad de agua que debe ser aportada por el equipo de riego en cada operación a fin de reponer el 100% del consumo.

En la figura 19 se ilustra de manera continua la evolución en el nivel de los parámetros ET0, ETc y lámina de riego aplicada durante las dos campañas analizadas. Mientras que en la figura 20, en barras verticales, se expresa en color naranja el consumo acumulado (estimado por el sistema en base a la ET0) y la lámina de riego acumulado; el análisis se realiza por cada mes dentro de la campaña.

En la campaña 2014-15 el consumo total estimado fue de 759mm y el riego total aplicado de 816mm. Mientras que en la campaña 2015-16 el consumo total estimado fue de 674mm y el riego total aplicado de 607mm. Realizando una comparativa, en la segunda campaña se redujo la aplicación de riego en 209mm, que cual representa 25% menos de riego que en la primera campaña.

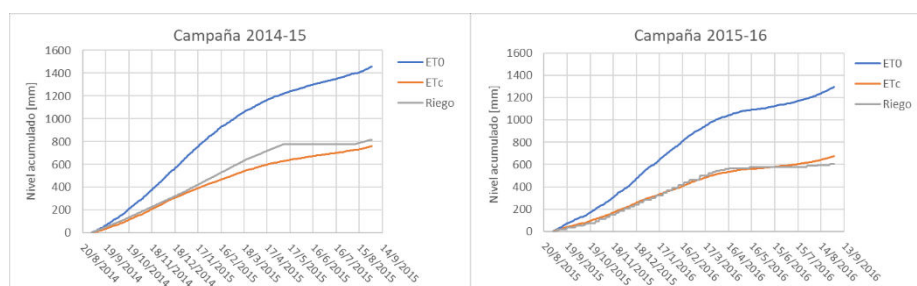


Fig. 19. Nivel acumulado de ET0, ETc y riego registrados durante dos campañas en olivos.

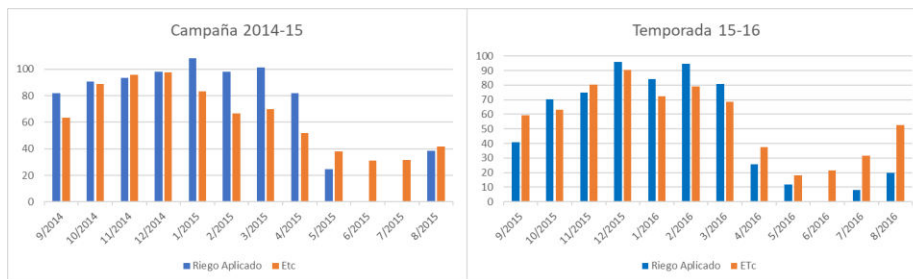


Fig. 20. Comparativa mensual de consumo ETc y aporte de riego durante las dos campañas.

A mediados del año 2016, se plantea dar mayor funcionalidad a la “Multiplataforma Riego Preciso”. Se obtuvieron nuevos aportes económicos por medio de financiamientos de proyectos de investigación que han permitido evolucionar en el diseño de nuevos módulos y componentes resultando en el sistema Telemetría Agrícola ya abordado con anterioridad.

El sistema de Telemetría Agrícola es el desarrollo más reciente (en el INAUT) en orden a generar nuevos conocimientos hacia el sector agrícola, y se encuentra en continua actualización y desarrollo de módulos que se anexan en función de los nuevos requerimientos tecnológicos o demandas que surgen por parte de los productores locales.

La primera experiencia con el nuevo sistema se ha realizado en una parcela experimental de tomates con destino a industria (figura 21.a); situada dentro de la estación experimental de INTA San Juan, localidad de Pocito. Los plantines se colocaron el día 18/09/2017 y la cosecha final se realizó el día 15/01/2018 (120 días de duración). La parcela cultivada se dividió en cuatro bloques de dimensiones iguales. Se instaló un equipo de riego por goteo sectorizado en tres operaciones de riego.

El ensayo de campo consistió en realizar tres tratamientos de riego diferenciados a fin de evaluar la productividad del agua para distintos regímenes de riego durante la última fase de desarrollo del tomate [36], a partir del día 12/1/2017 hasta la cosecha. Los tratamientos de riego se definieron como T0: Tratamiento testigo (se aporta el 100% de demanda); T1: tratamiento con riego deficitario controlado 1 (se aporta el 75% de demanda); y T2: tratamiento con riego deficitario controlado 2 (se aporta el 50% de demanda).

En un bloque del ensayo se instalaron tres estaciones de medición en campo para monitorizar lo ocurrido en cada tratamiento de riego. La humedad del suelo se registró a 20, 40 y 60cm de profundidad, también a los 40cm se registró conductividad eléctrica, temperatura del suelo, presión matricial (figura 21.b). Así mismo, se registró el aporte de agua en cada tratamiento, presión de agua en las cintas de riego, temperatura y humedad ambiente a 5 y 150cm de altura.

Durante el ensayo se realizaron vuelos con el dron (figura 21.c) al cual se montaron las cámaras multiespectral y termográfica y capturaron fotografías a 40m de altitud; ello sirvió para registrar imágenes de todo el cuadro de tomate y posteriormente evaluar el desarrollo del cultivo desde su etapa inicial, con mayor énfasis en el momento que se aplicaron los tratamientos de restricción hídrica. Al mismo tiempo que se efectuaron los vuelos, en el cultivo se realizaron mediciones de temperatura de dosel vegetal, conductividad estomática y potencial hídrico.



Fig. 21. Implementación del sistema de Telemetría Agrícola para gestionar tres tratamientos de riego en una parcela de tomates. (a) Parcela experimental de tomate (900m2). (b) Sensores instalados en las estaciones de medición. (c) Uso de cuatrirrotor para adquisición de imágenes multiespectrales y termográficas sobre el ensayo.

La determinación de las operaciones de riego se estableció en base al consumo diario del cultivo, basados en la estimación horaria de ETO y el coeficiente Kc del tomate (el cual varía durante la campaña). El sistema de información registra los valores estimados y presenta por pantalla al usuario el requerimiento de consumo de agua que deberá reponer con el próximo turno de riego (figura 22). Particularmente en el cultivo de tomate para industria la aplicación de la lámina de riego calculada en el paso anterior debe suministrarse en tres aplicaciones, principalmente para no producir encharcamiento superficial (nivel de saturación en la superficie del suelo).

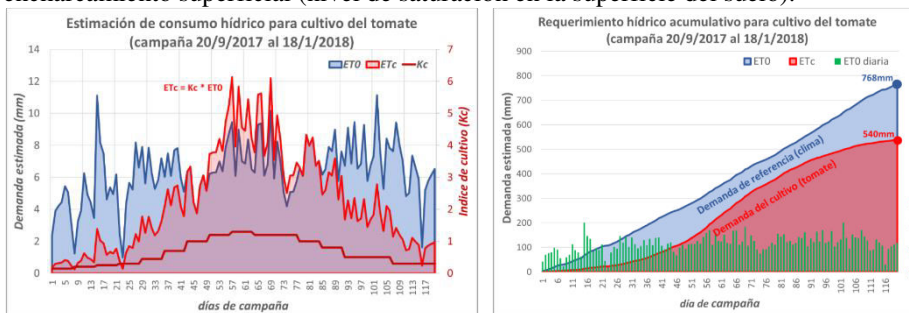


Fig. 22. Evolución en el requerimiento hídrico del cultivo ETC en base a la estimación de ETO y el coeficiente de cultivo de tomate Kc durante la campaña (tratamiento T1).

El sistema de control de riego mostró un alto grado de robustez en su funcionamiento. Cuando se produjeron fallas en el equipo de riego, los mensajes de alerta se registraron correctamente y fueron informados a los usuarios. Los intervalos

de inicio y período de duración de cada una de las operaciones de riego se cumplieron según lo establecido por los usuarios, por lo cual se logró la aplicación precisa del riego tanto a demanda (en el T0) como en restricción (T1 y T2). El sistema ha permitido registrar las variables de interés, como ser la evolución temporal de la humedad y conductividad en el suelo durante el ensayo (figura 23.a); como también registrar la cantidad de agua suministrada (litros) en cada tratamiento (figura 23.b), de lo cual se observa en el periodo final del ensayo, donde se efectuó la restricción hídrica, que el aporte fue menor en los tratamientos T1 y T2 según lo planificado inicialmente.

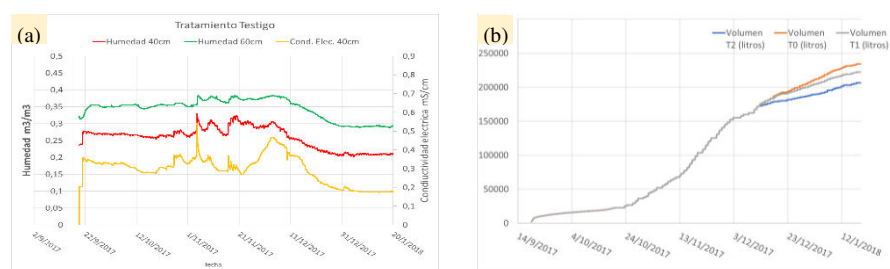


Fig. 23. Información disponible en el sistema de Telemetría Agrícola para el seguimiento de los tratamientos de riego. (a) Evolución de variables medidas en el suelo. (b) Cantidad de agua aportada (acumulada) en cada tratamiento de riego.

A modo solo ilustrativo, en la figura 24 se presentan algunos de los mapas que se logran obtener luego del procesamiento de las imágenes tomadas con las cámaras multiespectral y termográfica. De manera particular, analizando el mapa de temperatura (figura 24.d) se observa en color mas oscuro (puntos frios) las parcelas donde se realizaron los tratamientos sin restricción hídrica T0, mientras que en naranja/amarillo se identifican las zonas con tratamientos de mayor restricción hídrica T2.

El análisis agronómico y la obtención de resultados de cada uno de los mapa aquí presentados requieren de la atención particular y no es motivo del presente trabajo. A modo de síntesis, con intención presentar la funcionalidad del sistema de Telemetría Agrícola, de la inspección rápida de cada imagen se pueden identificar las zonas afectadas por el estrés hídrico inducido por la restricción de riego. Con esta primera inspección en el sistema el usuario ya tiene una noción sobre la existencia de variabilidad espacial en la parcela, por lo cual debe ir al campo para identificar problemas en el cultivo; ellos pueden originarse debido al deterioro o mal funcionamiento del equipo de riego y/o sus componentes, por la ocurrencia de plagas o enfermedades, daño por contingencia climáticas, entre otros inconvenientes.

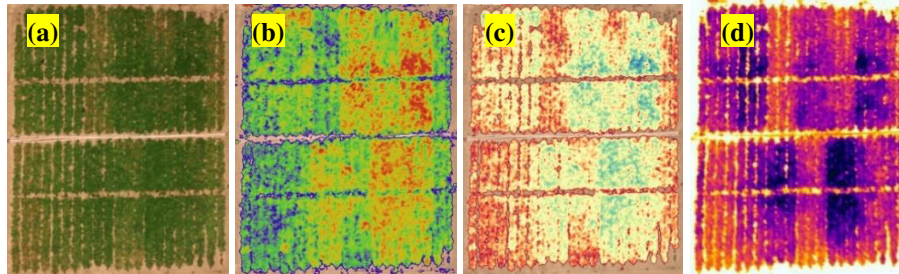


Fig. 24. Mapas obtenidos luego de procesar las imágenes capturadas desde el dron a 40m de altitud sobre un cuadro cultivado con tomate. (a) Parcela de tomate (RGB). (b) Mapa de clorofila. (c) Mapa de vegetación normalido en banda Red-Edge (NDRE). (d) Mapa de temperatura.

Concluida la campaña, se analizo la cantidad y calidad de la producción obtenida en cada tratameinto de riego. Se observaron diferencias en la cantidad, calidad y tamaño de tomates cosechados y en los niveles de contenido de ayucares (BRIX); siendo los resultados más favorable aquellos obtenidos en las parcelas donde se cumplió el tratamiento T0.

De la comparación en lo acontecido en cada tratameinto de riego, se pudo concluir que la productividad y calidad de los frutos en las variedades de tomate con destino a industria son sencibles a la falta de humedad en el suelo, por lo cual la gestion del riego debe realizarse de manera adecuada a fin de maximizar los resultados.

4 Otros aportes complementarios

Es importante mencionar que otras investigaciones fueron abordadas en el INAUT en relación a la agricultura de precisión, que por razones de espacio no han sido incluidas en el trabajo, pero que son importantes mencionar, como ser: diseño de controladores inteligentes de riego (CoRiInte), estación meteorológica con comunicación gsm para la predicción de heladas y viento Zonda, sensor de medición de contenido de agua en la vegetación, sistema de medición de nivel en un tanque evaporímetro tipo A con recarga automática, control y guiado de robots en entornos agrícolas basados en visión artificial, guiado de drones por hileras de cultivos basado en controladores de seguimiento de trayectorias. Los mismos pueden ser consultados en el sitio web del INAUT.

Las investigaciones en estas áreas se desarrollaron en forma conjunta con investigadores y técnicos pertenecientes al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental San Juan, sede Pocito. En cooperación se han realizado ensayos a campo y publicaciones científicas en Riego Deficitario Controlado en cultivos de vid, olivo, almendro, maíz y tomate, en los cuales se hizo uso de las tecnologías presentadas; pero que igualmente por razones de espacio no han sido incluidas en el escrito.

5 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado una revisión de los desarrollos en hardware y software logrados en la última década en el INAUT, los que han resultado ser herramientas relevantes y de impacto en el ámbito local con el objetivo de generar nuevos conocimientos en el manejo eficiente del riego a fin de enfrentar los problemas sobre la disponibilidad de agua.

En las primeras intervenciones se iniciaron investigaciones sobre el uso y desarrollo de sensores de humedad de suelo. A medida que fueron evolucionando y comercializando nuevos dispositivos en electrónica, comunicación e informática, se incorporaron nuevas tecnologías a fin de alcanzar nuevos desarrollos e investigaciones, lo cual permitió generar nuevos conocimientos en el manejo del riego. Hasta llegar al desarrollo reciente de una plataforma de Telemetría Agrícola en la cual se han integrado gran variedad de dispositivos de medición, comunicación y control, combinados con módulos informáticos y aplicaciones web que posibilitan la visualización remota de toda la información registrada de las explotaciones agrícolas.

Se logro el desarrollo de un sistema de gestión de riego que brinda información objetiva y organizada sobre el nivel de humedad del suelo, las variables climáticas, el estado de funcionamiento de los equipos de riego, la ejecución de las operaciones de riego, y distintos mapas sobre índices en el cultivo.

El diseño de la herramienta se basó en las políticas de Riego de Precisión; el usuario dispone de información para determinar de manera certera “dónde”, “cómo”, “cuándo” y “cuánto” regar. Posteriormente, examinando los registros históricos y observando lo ocurrido en campo (análisis temporal y espacial en conjunto) el usuario logra la capacidad de aprender, adecuar y corregir (en caso necesario) las estrategias de riego.

Las distintas experiencias realizadas en campo demostraron la importancia de registrar y monitorizar de manera continua aquellas variables y parámetros requeridos para definir la cantidad de riego oportuno. No se puede controlar aquello que no se mide; por tanto, si se desea hacer la aplicación precisa del riego se debe medir o estimar las variables de interés continuamente utilizando sistemas que automatizan la recolección de datos y posterior visualización en entornos visuales.

En los ensayos de campo se establecieron las operaciones de riego en base diferentes estrategias de Riego Deficitario Controlado durante determinados periodos fenológicos del cultivo. Con ello se logró ahorro de agua, aumento de la productividad del agua, y modificación de las características de los frutos a fin de cosecha y de productos derivados (por ejemplo, el aceite de oliva).

Con la implementación del sistema se lograr la gestión precisa y “a demanda” del riego, se pueden definir y ejecutar estrategias de RDC con alta precisión, se aumenta la eficiencia en cada aplicación de riego, y se maximiza la productividad del agua.

La monitorización y seguimiento sobre el funcionamiento del equipo de riego y sus componentes es muy importante en orden a conocer si realmente se realizaron las operaciones de riego y si efectivamente se aplicó la cantidad requerida. Los daños en

los equipos de riego hacia adentro de las fincas o cuarteles se detectaron de manera rápida evitando inconvenientes de estrés hídrico en los cultivos y/o pérdidas excesivas de agua.

No es posible generalizar el porcentaje o nivel de ahorro en los recursos que puede lograrse al incorporar las tecnologías de Riego de Precisión, en particular en la cantidad de agua. Sin embargo, es de notarse que la incorporación de las herramientas disponibles brinda al usuario la información necesaria para gestionar la explotación agrícola con objetivos tales como aumentar la productividad del uso del agua, expandir la zona cultivada, reducir consumo de energía eléctrica, entre otros.

A Telemetría Agrícola los usuarios acceden y visualizan la información de la finca, parcela o predio desde cualquier lugar a través de internet; no requieren descargar aplicaciones para el acceso al software; y siempre accede a la versión más reciente y actualizada del sistema. Además, al ser una plataforma multiusuario, se puede incorporar de manera inmediata nuevos usuarios que actúen (en línea) como asesores en riego o consultores externos en temas propiamente agronómicos.

La puesta en marcha de la plataforma a resultado en un acercamiento positivo por parte de los productores y agrónomos hacia las tecnologías disponibles. Aquellos que hicieron uso, identificaron rápidamente las ventajas de tomar las decisiones de gestión del riego y del manejo del cultivo según la información recolectada por el sistema.

Agradecimientos

Las tareas de investigación y desarrollo presentados en el trabajo se realizaron con el apoyo y el financiamiento del Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), del Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias (INTA), del Fondo Argentino Tecnológico (FONTAR), de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno de San Juan.

Agradecer toda la ayuda brindada por los investigadores, técnicos y personal de campo del INTA - EEA San Juan; Facundo Vita Serman, Luis Bueno, Alfredo Olguin, Sonia Silva, Aníbal Sarasua, Maximiliano Batistella, Mario Liota, y todos quienes aportaron esfuerzo y dedicación en los ensayos de campo.

Agradecer al Ing. Agr. Juan José Farías quien puso a disposición el lugar de experimentación de olivos dentro del “Establecimiento San Francisco” y al Ing. Agr. Esteban Santipolío de la empresa “Consultora Interagro S.A.”

Un especial reconocimiento al Prof. Mg. Carlos Schugurensky, ya retirado, quien fuera el realizador de las primeras investigaciones en sensores de humedad de suelo y de riego inteligente dentro del INAUT.

Resaltar la importancia que han tenido las diferentes ediciones del Congreso Argentino de Agroinformática (CAI) que permitió la presentación y difusión de la mayoría de los trabajos presentados en el escrito. Agradecer a su iniciador Marcelo

Bosch y los posteriores chair; como así también agradecer a la Sociedad Argentina de Informática (SADIO) por darle lugar al CAI dentro de las Jornadas Argentinas de Informática.

Referencias

1. Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E., Raes D.: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y drenaje N° 66. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma, Italia. (2012)
2. AQUASTAT. Sistema de información global sobre el agua de FAO. División de Tierras y Aguas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012)
3. Gómez del Campo M., Morales Sillero A., Vita Serman F., Rousseaux M. C., Searles, P. S.: El olivar en los valles cálidos del Noroeste de Argentina. *Olivae* 114: 23-45. (2010)
4. López J. R.: Riego localizado, II edición, Ed. Mundi-Presa, España. (1997).
5. Smith R. J., Baillie J. N., McCarthy A. C., Raine S. R., Baillie C. P.: Review of precision irrigation technologies and their application. National Centre for Engineering in Agriculture. University of Southern Queensland. Toowoomba. (2010).
6. Allen R.G., Pereira L., Raes D., Smith M. : Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivo. Estudio FAO: Riego y drenaje N° 66. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia. (1998)
7. Vita Serman F., Capraro F., Tosetti S., Cornejo V., Carelli A., Ceci L.: Intelligent irrigation control in olive groves (*Olea Europaea* L.): A novel approach for water resource optimization. *Acta Horticulturae* (ISHS). (2012)
8. Green, S.R., Clothier, B.E., Jardine, B.: Theory and practical application of heatpulse to measure sap flow. *Agronomy Journal* vol. 95, pp. 1371–1379. (2003)
9. Fernández, J.E., Cuevas, M.V.: Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 150, pp.135–151. (2010).
10. Nadler, A., Tyree, M.T.: Substituting stem's water content by electrical conductivity for monitoring. (2008)
11. Rodríguez Domínguez C. Ehrenberger W., Sann C., Ruger S., Sukhorukov V., Martín Palomo M. J., Díaz Espejo A., Cuevas M. V., Torres Ruiz J. M., Pérez Martín A., Zimmermann U. Fernández J. E.: Concomitant measurements of stem sap flow and leaf turgor pressure in olive using the leaf patch clamp pressure probe. *Agricultural Water Management* vol. 114, pp 50-58. (2012)
12. Schugurensky C., Lage A., Pucheta J., Vita Serman F: Patente de invención AR051483B1. "Dispositivo sensor capacitivo para la medición de humedad volumétrica y la temperatura de un medio circundante" (2009).
13. Schugurensky C. y Capraro F.: Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA). Chile. (2008)
14. Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F.: Real-time soil moisture control for very high frequency drip irrigation in olive groves. *Acta Horticulturae* (ISHS) 888:239-246. (2011)
15. Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F.: Laboratorio Virtual y Remoto para Simular, Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, Vol. 7 (1), 73-84. (2010)

16. Goodwin I and Jerie P.: Regulated deficit irrigation: from concept to practice. In: *Advances in Vineyard Irrigation*. Australia. Winetitles (Ed) pp 258-261. Australian Society Viticulture and Oenology. (1992)
17. Fereres E y Soriano A. M.: "Deficit irrigation for reducing agricultural water use". *Journal of Experimental Botany* 58, 147-159. (2007)
18. Goldhamer D., Dunai J., Ferguson L.: Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae* 356, 172-175. (1994)
19. Moriana, A., Pérez-López D., Gómez Rico A., Salvador M., Olmedilla N., Ribas F., Fregapane G.: Irrigation scheduling for tradicional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. *Agr. Water Manag.* 87, 171-179. (2007)
20. Reynolds A. and Naylor A.: Pinot Noir and Riesling grapevines respond to water stress duration and soil water - holding capacity. *Hort Science* 29:1505-1510. (1994)
21. Perez Peña J.: Restricciones hídricas durante el desarrollo de la baya y su influencia en el crecimiento vegetativo, reproductivo, rendimiento y calidad enológica de la uva variedad Cabernet Sauvignon. (Tesis). Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. (2001)
22. Gómez-Rico A., Salvador M.D., Moriana A., Pérez D., Olemdilla N., Ribas F., Fregapane G.: Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chem* 100: 568-578. (2007)
23. Santesteban L. G., Miranda C., Royo J. B.: Regulated deficit irrigation effects in cv. 'tempranillo' vineyards grown under semiarid conditions in mid-ebro river valley (Spain). *Acta Horticulturae* 754: 501-506 (2007)
24. Capraro F., Tosetti S., Vita F., Patiño D., Schugurensky C., Fullana R.: Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (*olea europaea* l.) empleando LABVIEW. III sesion Agroinformática. 37° JAIIO. ARGENTINA. (2008).
25. Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Vita Serman F., Capraro F.: Plant and soil water status behavior under different irrigation strategies in cultivar 'Arbequina' olive orchard. *Acta Horticulturae (ISHS)* 889:311-316. (2011)
26. Vita Serman F., Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Carelli A., Capraro F: 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. (2011)
27. Capraro F., Tosetti S., Mut V.: Telemetría Agrícola. Un acercamiento hacia las nuevas tecnologías disponibles en riego de precisión. X Congreso Argentino de Agroinformática, 47° JAIIO. Buenos Aires. Argentina (2018).
28. Rossomando F. G., Soria C., Carelli R.: Autonomous Mobile Robot Navigation using RBF Neural Compensator. *Control Engineering Practice*, 19, 215–222. (2011)
29. Herrera d., S. Tosetti and R. Carelli: Dynamic Modeling and Identification of an Agriculture Autonomous Vehicle. *IEEE Latin America Transactions*, vol.14, no.6, pp.2631-2637, (2016)
30. Soria C., M. Muñoz, R. Carelli, P. Campillo, A. Cúnsulo: Measure of foliar surface of olives using an autonomous all-terrain vehicle. VII International Symposium on Olive Growing, International Society for Horticultural Science (ISHS). San Juan. Argentina. (2012)
31. Zhang C. y J. M. Kovacs: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *An Int Jour on Advances in Precision Agriculture*, pp.693-712. (2012)
32. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P.J., Fereres, E.: Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system, *Irrig Sci* 33:43–52. (2015)
33. Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F., Campillo P., Mut V.: Sistema de monitorización de humedad del suelo y de variables climáticas para manejo de un sistema de riego. En *anales de*

- XXIV Congreso Argentino de Control Automático - AADECA, Buenos Aires, ARGENTINA. (2014)
34. Capraro F., Tosetti S., Campillo P., Rodríguez D., Farías J. J.: Multiplataforma riego preciso. puesta en marcha y primeras experiencias en un olivar en la provincia de San Juan. VII Jornadas de Actualización en Riego y Fertiriego, Mendoza, ARGENTINA. (2015)
 35. Fereres, E., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L.: Water requirements and irrigation scheduling in olive. *Acta Hort.* 888, 31-40. (2011).
 36. Fortes Gallego R., Prieto Losada M., Gonzalez García J. A., Millán S., Campillo Torres C.: Evaluación del efecto del estrés hídrico en las diferentes fases de cultivo de Tomate sobre la calidad y la producción. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas, Madrid. (2013)