

Monitoreo de variables y gestión de estrategias de riego deficitario en un olivar superintensivo empleando nuevas tecnologías de Agricultura Digital.

Flavio Capraro*, Pedro Campillo*, Rodrigo Gimenez*, Alida Ortiz*,
Luciana Gentili**, Pierluigi Pierantozzi**

* Instituto de Automática INAUT (UNSJ – CONICET)
Av. Lib. Gral. San Martín 1112 (o), Ciudad Capital, San Juan, ARGENTINA

`fcapraro@inaut.unsj.edu.ar` ; `campillo@inaut.unsj.edu.ar` ;
`rgimenez@inaut.unsj.edu.ar` ; `aortiz@inaut.unsj.edu.ar`

** CONICET - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA San Juan)
Calle 11 y Vidart. Departamento Pocito, San Juan, ARGENTINA

`gentili.luciana@inta.gob.ar` ; `pierantozzi.pierluigi@inta.gob.ar`

Resumen. En el trabajo se presenta la instalación y puesta en marcha de un sistema de medición, registro y monitoreo de variables en una zona cultivada utilizando nuevas tecnologías de Agricultura Digital, como es el uso de estaciones de medición en campo que registran sistemáticamente la humedad del suelo, la presión de sistema de riego, la cantidad de agua aportada, la temperatura ambiente y la temperatura del cultivo; además una estación meteorológica automática que registra todas las variables ambientales y estima la evapotranspiración de referencia del cultivo. Esta información es complementada con mapas de índices del cultivo que se generan con imágenes termográficas y multiespectrales tomadas desde un dron que vuela sobre la zona cultivada. Actualmente, en la olivicultura moderna se implantan olivares con marcos de plantación intensivos y superintensivos lo cual ha motivado la generación de nuevas investigaciones que permitan establecer factores que favorezcan la adaptación climática y uso del agua en el riego. Conforme a ello, se realizó una experiencia en un olivar joven superintensivo ubicado en la provincia de San Juan, Argentina. Con el objetivo de monitorizar y evaluar el desarrollo y estado hídrico de los olivos, se implementaron cuatro tratamientos de riego con reposición del 100 % y 70 % de la demanda hídrica real durante todo el ciclo (riego deficitario sostenido) y con reposición del 50 % y 25 % de la demanda hídrica real en distintos periodos del ciclo (riego deficitario controlado). Finalmente se presentan los primeros resultados preliminares alcanzados en la etapa inicial de experimentación durante los primeros meses de uso del sistema, en el monitoreo de las principales variables intervinientes y en la gestión de las estrategias de riego en cada tratamiento.

Palabras claves: Agricultura Digital, Telemetría Agrícola, Sensores, Riego de precisión, Olivicultura.

1 Introducción

En los últimos años, bajo las premisas de la olivicultura moderna, las nuevas plantaciones de olivos se desarrollaron con gran atención en la elevada densidad de plantación y en la alta tecnificación en el uso de sistema de riego presurizado y mecanización, entre otros aspectos [1]. Esto conlleva a que los nuevos sistemas de cultivos sean superintensivos, con plantaciones de alta densidad y conducción en seto, utilizando variedades de bajo vigor y el rápido inicio de la producción de aceitunas, con el objetivo de facilitar la cosecha y la recolección mecanizada [2][3].

El olivo es un cultivo característico de la zona Mediterránea y resistente a la sequía, cultivado tradicionalmente en secano, sin embargo, se ha determinado que la falta de agua en momentos críticos durante las fases sensibles del desarrollo puede afectar significativamente el crecimiento y la producción [4]. Considerando la expansión de la olivicultura a zonas con condiciones ambientales distintas a las que el cultivo está habituado, es necesario investigar, detectar y analizar las mejores condiciones de adaptación y desarrollo en el ámbito local.

En la provincia de San Juan, ubicada en la región de Cuyo al oeste de Argentina, los sistemas agrícolas son dependientes del riego debido a la alta demanda de agua de los cultivos y al reducido aporte de agua de lluvia (concentradas en época estival y aportan entre 90 a 110 mm anuales) [5]. En la gran mayoría, los olivares son regados con sistemas de riego por goteo. Con estos sistemas de riego se logra mejorar la eficiencia en el uso del agua debido a que su aplicación se realiza de manera localizada y con la adecuada programación en base a las necesidades hídricas reales [6].

Hoy en día la provincia de San Juan, en similitud con la región, enfrenta una grave crisis hídrica la cual ha impactado desfavorablemente en el desarrollo agrícola debido a la baja disponibilidad de agua. Este aspecto ha enfatizado la importancia de realizar la correcta gestión del recurso hídrico y evolucionar de forma rápida hacia nuevas técnicas de “Riego de Precisión”. Bajo este concepto, la gestión del riego se realiza en base a un proceso dinámico y continuo de análisis de información, el cual involucra de manera integrada datos de: condiciones del clima (evapotranspiración de referencia ETo), requerimientos hídricos del cultivo (coeficientes de cultivo Kc , fenología y cobertura vegetal), estado de las condiciones del suelo (niveles de humedad y nutrientes) y funcionamiento de los equipos de riego (activación de zonas de riego).

En forma complementaria a la gestión del riego, es conveniente realizar el monitoreo periódico de la uniformidad dentro de la parcela. Para esta tarea se disponen de herramientas digitales que, mediante el análisis de imágenes multispectrales o termográficas tomadas de las zonas cultivadas, proporcionan información sobre el estado hídrico y el crecimiento de los cultivos. Las herramientas permiten calcular índices del cultivo que se representan en un mapa a fin visualizar la variabilidad espacial en un momento determinado de la campaña. Estas tecnologías suelen presentarse en la agricultura moderna como “Sensado Remoto” [7].

Los índices de vegetación se determinan por la combinación de las imágenes disponibles. La metodología radica en realzar la cubierta vegetal en función de la respuesta espectral y atenuar la influencia de otros componentes de la imagen como son el suelo, edificios, objetos, iluminación, etc.. El resultado es una nueva imagen en

donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con los parámetros de las coberturas vegetales (densidad, área foliar, clorofila, entre otros) [8]. Los índices de vegetación más utilizados son: NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado), EVI (Índice de Vegetación Mejorado), SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) y su variante optimizada OSAVI, ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera), GCI (Índice de Clorofila Verde), PRI (Índice de Reflectancia Fotoquímica), SIPI (Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura), entre otros [9]. En zonas con cultivo bajo riego es importante conocer el estado hídrico de los cultivos, para tal caso suele estimarse el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI; “*Crop Water Stress Index*”), propuesto por Idso *et al.* [10]. El cálculo de este índice se determina en base de la medición de la temperatura del cultivo y en las condiciones meteorológicas del entorno.

Las investigaciones reportadas en [11] y [12] muestran que, para cultivos frutales de estructura leñoso, la T_c y el CWSI presentan alta sensibilidad a las condiciones de estrés hídrico del cultivo, por lo cual se logra identificar zonas con estrés hídrico asociado a problemas de riego. Mientras que el uso de otros índices de vegetación permite identificar diferencias en el desarrollo del cultivo asociadas a inconvenientes sobre el manejo del mismo, presencia de enfermedades o deficiencia en fertilización.

Haciendo énfasis en la realidad de la actividad agrícola primaria de la provincia de San Juan y en la grave crisis hídrica que se enfrenta desde hace varios años, en el Instituto de Automática (INAUT) se desarrollan e investigan diversas soluciones tecnológicas que permiten traccionar la actividad local hacia una agricultura moderna con alta eficiencia en el manejo del riego. Particularmente, se ha desarrollado y se dispone de un sistema de monitoreo remoto, denominado Telemetría Agrícola [13], que permite conocer en tiempo real la evolución de diferentes variables registradas en el suelo y los cultivos, el funcionamiento de los equipos de riego y las condiciones climáticas de la zona. El sistema integra diferentes tecnologías en electrónica, comunicación, sensores, control automático e informática para permitir la visualización ordenada de la información, a fin de lograr que los productores locales tengan un acercamiento a las nuevas tecnologías disponibles para gestionar el riego con precisión [14].

En este trabajo se presenta la implementación del sistema de Telemetría Agrícola, como una herramienta moderna de Agricultura Digital, para la monitorización de diferentes variables en una parcela experimental de cultivo de olivo (superintensivo) con riego por goteo, ubicado en la Provincia de San Juan, Argentina. En base a la información recopilada se realizó la gestión de cuatro estrategias de riego con el objetivo de generar distintas condiciones en el estado hídrico del olivar y evaluar la adaptación del olivo al lugar. Finalmente se presentan los primeros resultados alcanzados durante los primeros meses de ensayo y un breve análisis de los mismos.

2 Métodos y materiales

2.1 Descripción del sitio de experimentación en campo

Para llevar adelante la experimentación a campo se dispuso de un olivar superintensi-

vo (cv. Arbosana), con marco de plantación de 4 m entre líneas y 1,75 m entre plantas (4 x 1,75), las líneas se disponen en sentido norte-sur, según se puede observar en la figura 1. La estructura del olivar se la puede describir como un seto bajo, con una altura promedio de los árboles de 2.5 m. El olivar está situado dentro de la estación experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de la provincia de San Juan (INTA EEA San Juan), en la localidad de Pocito. Las coordenadas geográficas centrales son: 31° 39' 32,57" S; 68° 35' 22.82" O; 620 msnm. El clima de la región es de características semiárida, con alto nivel de evapotranspiración diaria y bajo aporte de lluvias (aproximadamente 100 mm anuales) [5].

El olivar se dividió en dos sectores (Bloque 1 y Bloque 2) de iguales dimensiones y características que corresponden a dos repeticiones dentro del ensayo. En los márgenes derecho e izquierdo se identifica una hilera de cultivo que cumple la función de borduras por lo cual no se consideran en los análisis. Como se observa en la figura 2, dentro de cada bloque se sitúan 4 parcelas de riego que están conformadas por 3 líneas de olivos. En cada parcela se aplica un tratamiento de riego con el objetivo de diferenciar las condiciones hídricas dentro del olivar y con ello evaluar la adaptación del cultivo a la región y a las diferentes condiciones de riego.

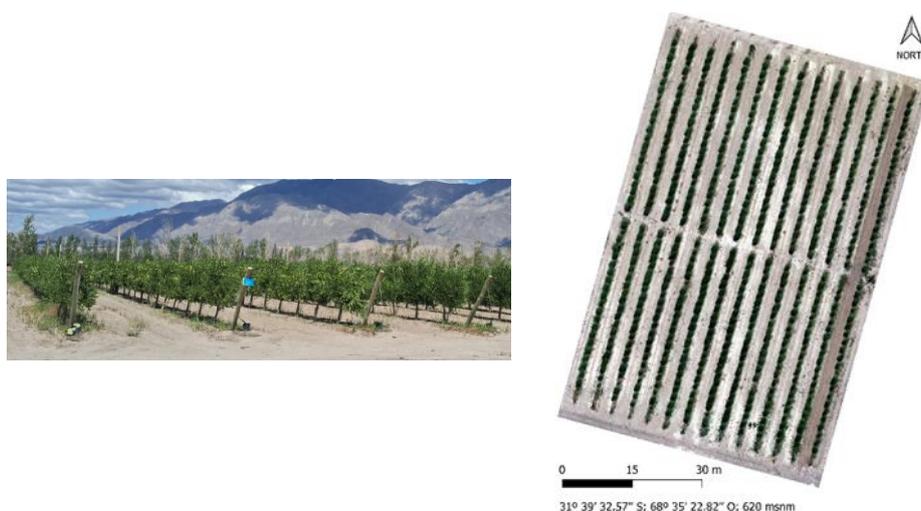


Fig. 1. Zona de experimentación. Fotografía del olivar superintensivo (4 x 1,75) con sistema de riego por goteo e imagen aérea de la zona de estudio.

2.2 Tratamientos de riego y gestión del riego

En el olivar se instaló un sistema de riego por goteo, con emisores de 4 L/h de capacidad y separación de 80 cm, con un lateral de riego por cada línea de plantas. La tasa de precipitación bruta (Pr) del sistema de riego es de 1,25 mm/h. El sistema de riego se subdividió en cuatro unidades para lograr el riego diferenciado de cada parcela. En la figura 2 se presenta la demarcación de cada bloque y tratamiento de riego.

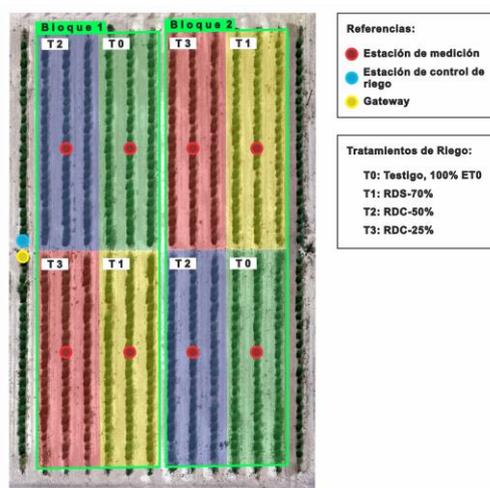


Fig. 2. Sectorización de la zona de estudio en dos bloques (repeticiones) y demarcación de las parcelas donde se aplican cuatro tratamientos de riego diferenciado (T0, T1, T2 y T3) representados sobre el mapa por rectángulos de diferente coloración.

La programación de los turnos de riego se determinó con el objetivo de reponer el 100 % de las necesidades hídricas del cultivo (ET_c) [6], en base a la evapotranspiración de referencia (ET₀) diaria y al coeficiente de cultivo (K_c) según (1).

$$ET_c [mm] = ET_0 * K_c \quad (1)$$

Durante la campaña se implementaron dos estrategias de riego, una de riego deficitario sostenido (RDS) y otra de riego deficitario controlado (RDC). En orden a ello, se definieron cuatro tratamientos de riego diferenciados, según se indica a continuación:

T0: Tratamiento testigo RDS-100. Reposición del 100 % de la ET_c consumida durante todo el año.

T1: Tratamiento con riego deficitario sostenido RDS-70. Reposición del 70 % de la ET_c durante todo el año.

T2: Tratamiento con riego deficitario controlado RDC-50. Reposición del 50 % de la ET_c. Excepto durante los períodos críticos de prefloración/floración, endurecimiento de endocarpo y final de la fase de acumulación de aceite donde en estos periodos se repone el 100 % de ET_c.

T3: Tratamiento con riego deficitario controlado RDC-25. Reposición del 25 % de la ET_c. Excepto durante los períodos críticos de prefloración/floración donde se repone el 100 % de ET_c, mientras que para los periodos de endurecimiento de endocarpo y final de la fase de acumulación de aceite se repone el 75 % de ET_c.

ET₀ fue calculada con la metodología Penman–Monteith modificada propuesta por FAO [15]. El K_c fue variante, considerando el valor de 0,68 para el periodo entre los meses de septiembre a abril, y el valor de 0,4 para el periodo de mayo a agosto.

2.3 Sistema de registro y monitoreo de variables Telemetría Agrícola

Para realizar el registro de datos y la monitorización de las variables de interés se ha utilizado el sistema de Telemetría Agrícola, el cual fue desarrollado en el Instituto de Automática en el año 2018, con posteriores actualizaciones en el entorno visual para mejorar la experiencia de usuario. Esta herramienta se basa en las nuevas tecnologías de Agricultura Digital, en la cual se integran diferentes dispositivos electrónicos, sensores, comunicación inalámbrica y programas informáticos con el objetivo de automatizar la recopilación y ordenamiento de la información referida a los procesos productivos agrícolas. En la figura 3 muestra un diagrama general con los principales componentes, seguido a la figura se realiza una descripción de los mismos.

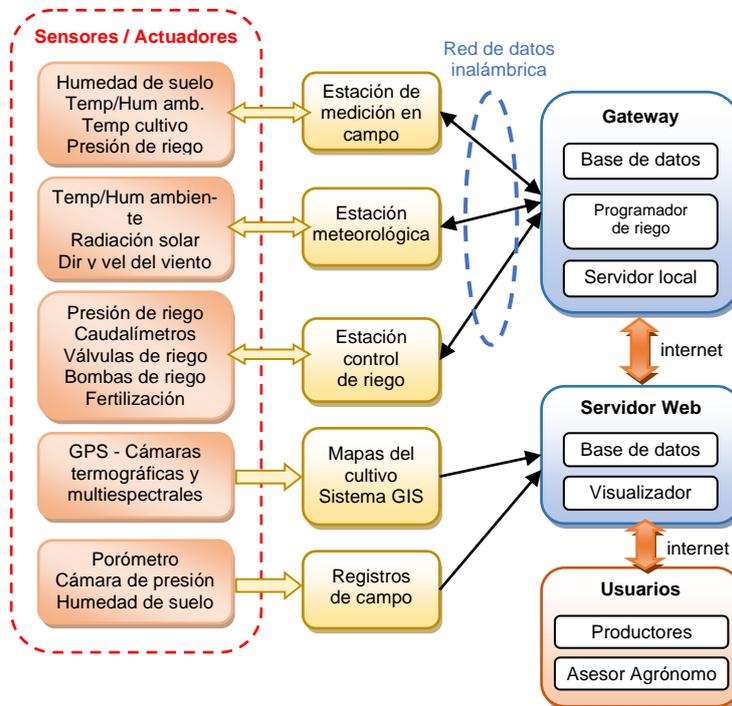


Fig. 3. Diagrama general del sistema de Telemetría Agrícola implementado para la gestión y el seguimiento de tratamientos de riego en un olivar superintensivo.

(i) *Estación de medición en campo.* Consiste en una estación automática conformada por un registrador de datos que almacena las mediciones sistemáticamente (en el presente caso, cada 10 minutos). La estación dispone seis entradas de medición donde se conectan los sensores según la necesidad del usuario. El concentrador de datos se desarrolló en el Instituto de Automática y se basa en el uso de un microcontrolador de bajo consumo y de alimentación por energía solar [16], ver figura 4.a.

Para acceder y descargar los datos almacenados se ha utilizado una red inalámbrica con topología en malla (mesh network) de la firma APPCOM. La red opera en banda libre de 470 MHz y la comunicación es basada en un protocolo propietario, denomi

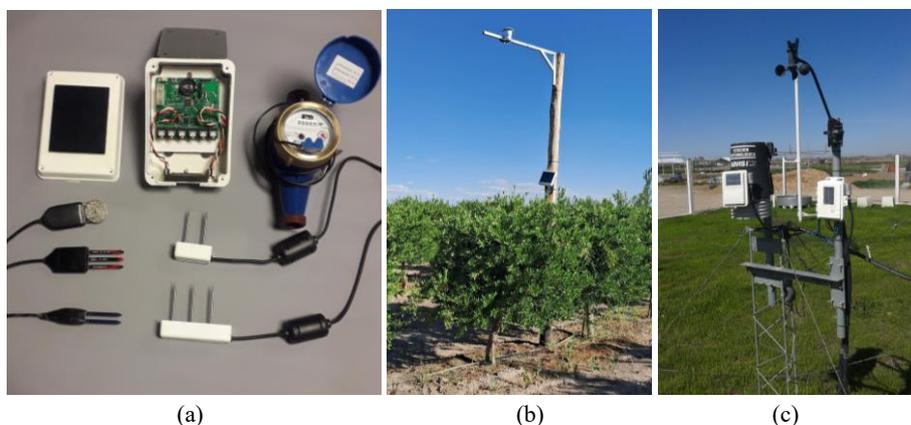


Fig. 4. Componentes del sistema de Telemetría Agrícola instalados en el ensayo: (a) Estación de medición autónoma y sensores para el registro de datos. (b) Instalación de la estación de medición en una parcela de riego. (c) Estación agrometeorológica situada dentro del predio.

nado WRNET bajo el método host/cliente. En cada estación se integra un transceptor APC230N con antena de 3 dBi.

Cada estación de medición tiene conectado seis sensores: un caudalímetro (salida a pulsos) montado en la cañería secundaria de riego, un sensor de presión Motorola MPX5700 insertado en la manguera de riego, dos sensores de humedad de suelo Decagon EC-5 situados a 30 cm y 70 cm de profundidad, un sensor de humedad, conductividad y temperatura de suelo Decagon 5-TE situado a 50 cm de profundidad, y un sensor de temperatura (por infrarrojos) Melexis MLX90614 ubicado a 180 cm sobre el dosel del cultivo para registrar la temperatura del mismo y del ambiente.

En el ensayo se han instalado 8 estaciones de medición (figura 4.b), situadas en la parte central de cada parcela de riego. En la figura 2 se identifican con círculos rojos.

(ii) Estación agrometeorológica: En cercanías del ensayo se instaló una estación marca Davis, modelo Vantage Pro II (figura 4.c), empleada para registrar las variables climáticas y estimar la ETo horaria. La ETo es requerida para determinar las necesidades hídricas del olivo, según se indicó en (1), y establecer las aplicaciones del riego.

(iii) Estación de control de riego. En la parte central del ensayo se ubica una estación de control del sistema de riego por goteo (indicada en la figura 2 con un círculo azul). La estación cuenta con un controlador de riego automático, en el cual se programa diariamente el tiempo de riego de cada parcela en base al tratamiento en curso. Desde la estación se automatizan las operaciones de riego mediante el accionamiento de las electroválvulas de cada parcela de riego, las aplicaciones de inyección de fertilizante y las tareas de limpieza de los filtros por el método de retrolavado.

(iv) Gateway: El gateway (puerta de enlace) es un dispositivo electrónico (indicado en la figura 2 con círculo amarillo) que cumple dos funciones. La primera consiste en administrar la red inalámbrica de comunicación de las estaciones de medición y al mismo tiempo recopilar las mediciones; cada 10 minutos se realiza una solicitud de datos y se almacenan en una base de datos local. La segunda es vincular la información con la plataforma web y recibir las órdenes para accionar el sistema de riego.

El gateway opera en base a una minicomputadora Raspberry Pi4 con sistema operativo Raspbian basado en Linux. Para la transferencia de datos (desde las estaciones) de forma inalámbrica se emplea un módulo concentrador APPCOM APC910M. En la red es posible lograr enlaces de hasta 2.000 m de alcance. Además, se dispone de una red wi-fi que posibilita la conexión a internet y así transferir la información de la base de datos local hacia otra base de datos relacional MySQL alojada en un servidor web.

v) *Mapas de cultivo*: Durante la campaña se utilizaron mapas con diferentes índices del cultivo que permiten evaluar la variabilidad espacial dentro de cada parcela. Para esto, primeramente, se adquieren imágenes aéreas de la zona cultivada con cámaras especiales que son transportadas por un dron que sobrevuela el cultivo.

La adquisición de las imágenes se realizó con una cámara termográfica Flir Vue Pro-R 640 (7.5 - 13.5 μm) y una cámara multispectral Micasense RedEdge que dispone de 5 bandas: azul (475 nm), verde (560 nm), rojo (668 nm), infrarrojo cercano (NIR) (717 nm), y borde rojo (Red Edge) (840 nm). Ambas cámaras se fijaron en la parte inferior de un dron cuatrirrotor, 3DR Robotics Solo (figura 5.a). En el terreno se ubicaron 9 marcas de terreno (placa circular de 30 cm recubiertos de papel aluminio).

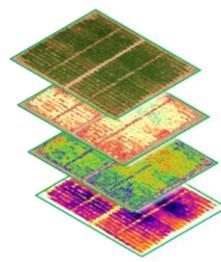
La primera etapa del procesamiento consistió en fusionar las imágenes para lograr un ortomosaico por cada conjunto de imágenes. Posteriormente se ajustó la posición y orientación del ortomosaico utilizándose los 9 puntos de control en tierra (GCP) georeferenciados. Finalmente se ajustaron los niveles de reflectancia y de temperatura mediante las respectivas curvas de calibración. Construidos los ortomosaicos, se realizan los cálculos de índices que sean necesarios mediante un sistema GIS (figura 5.b), en este caso se utilizó el software QGIS, versión 3.10 y diferentes complementos destinados al procesamiento de mapas, generación de índices y análisis estadístico de la información en cada parcela. Mayores detalles han sido presentados en [17].

El levantamiento de las imágenes se realizó cada 15 días y en los momentos de cambio de fase del desarrollo de cultivo. Los vuelos del dron se realizaron entre las 13 hs a 14 hs, 60 m de altitud y 5 m/s de velocidad, con un solapamiento entre imágenes del 80 % en el sentido vertical y horizontal. La resolución del pixel en los ortomosaicos y mapas de índices del cultivo es de aproximadamente 4 cm.

Todo el procesamiento de las imágenes se realiza fuera de línea. Obtenidos los mapas con los índices de interés se cargaron manualmente en la base de datos del servidor web a fin de que los usuarios puedan visualizar los mismos en la plataforma.



(a)



(b)

Fig.5. Generación de mapas de la zona cultivada. (a) Cuatrirrotor equipado con una cámara termográfica y una cámara multispectral de 5 bandas. (b) Mapas del cultivo generados a partir de los ortomosaicos termográficos y multispectrales (imágenes ilustrativas).

vi) *Registros de campo*: Durante la campaña, el mismo día en que se capturan las imágenes de la zona cultivada, se registran mediciones en el cultivo y en el suelo.

Para conocer el estado hídrico del cultivo se miden el nivel de conductancia empleando un porómetro Decagon Devices SC-1 adecuadamente calibrado y el nivel de potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja}) con una cámara de presión mediante el método propuesto por Scholander [18]; mientras que para analizar el desarrollo vegetativo del olivo se mide el crecimiento de brindillas, la altura de la planta y el diámetro del tronco. En complemento, se realizan mediciones de humedad gravimétrica en el perfil de suelo mediante la extracción de muestras (aproximadamente 100 cm³) con el uso de un barreno; el valor de la humedad de cada muestra se determina por el método diferencia entre el peso de suelo húmedo y de la muestra secada en estufa a 105 °C.

En las filas centrales de cada parcela fueron seleccionadas 5 plantas de referencia y representativas en las cuales se hacen las mediciones anteriormente mencionadas. Todos los registros se deben ingresar manualmente en una plantilla disponible en la plataforma de monitorización y quedan almacenadas en la base de datos.

vii) *Servidor web*: El sistema de telemetría cuenta con un servidor web ubicado en el centro de cómputos de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). En dicho servidor se ejecutan todos los servicios relacionados a la recepción de información desde las zonas agrícolas (parcelas de ensayos, fincas, campos, etc.), el almacenamiento de las mediciones, datos y mapas en las bases de datos, los algoritmos de procesamiento de información y la plataforma web Telemetría Agrícola destinada para que el usuario pueda visualizar y monitorizar todo lo referido a la zona agrícola de interés.

viii) *Entorno web*: Consiste en una interfaz de visualización que permita a los usuarios acceder a toda la información del sistema de Telemetría Agrícola de forma sencilla a fin de interpretar lo sucedido en el cultivo, el clima y en el equipo de riego. En la figura 6 se despliegan las capturas de pantallas de las operaciones más relevantes al momento de programar los turnos de riego. La plataforma se ha desarrollado en formato web y está organizada con un menú lateral para desplegar la información.



Fig. 6. Interfaz de usuario de la plataforma Telemetría Agrícola. (a) Visualización de las variables climáticas y registros diarios de la ETo. (b) Gestión del riego y monitorización de las variables registradas en las estaciones de campo, asociadas a la parcela de riego o tratamiento.

ix) *Usuarios*: Los consumidores de todo este conjunto de tecnologías de Agricultura Digital son los usuarios del sistema de monitoreo. Cada usuario dispone de acceso a la plataforma mediante su registro de usuario y clave, lo cual le permite realizar

el seguimiento desde cualquier dispositivo electrónico que disponga con conexión de internet y un navegador web. El acceso es multiusuario, por tanto, la información puede ser monitorizada y analizada al mismo tiempo por varios usuarios en línea; de esta manera los productores consiguen ser asesorados de forma rápida y remota por otros profesionales o colegas sin necesidad de concurrir al predio.

2.4 Planificación y seguimiento de las estrategias de riego

La planificación del riego en cada parcela se efectúa según la siguiente metodología. La programación del turno de riego requiere definir tres parámetros, que son: lugar o parcela a regar, momento de inicio, y duración del riego.

En el presente ensayo, el riego se inició simultáneamente en los cuatro tratamientos, ya que el diseño del sistema de riego por goteo lo permite. El riego se aplica los días lunes, miércoles y viernes de cada semana, iniciándose a las 9hs en simultáneo.

La duración del riego se determinó en base a reponer la lámina que fue consumida por el cultivo ETc. Dicha ETc se calculó empleando la ecuación (1) en donde debió considerarse el porcentaje de reposición definido para cada tratamiento y la ET0 acumulada desde el momento de aplicar el último riego. El valor obtenido es dividido por la tasa de precipitación del sistema de riego ($Pr = 1,25 \text{ mm/h}$) a fin de calcular el tiempo de aplicación del riego. Luego, el tiempo de inicio y tiempo de duración es establecido manualmente en el controlador de riego encargado de realizar la apertura y cierre de las válvulas conforme a la programación establecida. Actualmente, la programación del riego se realiza manualmente, para cada instancia de riego.

En simultáneo, se realiza el seguimiento de las variables medidas en el suelo, el cultivo y el clima desde la plataforma web Telemetría Agrícola (<http://telemetria.inaut.unsj.edu.ar/inicio/>). En el monitoreo que se efectuó día a día se evaluó principalmente que los tratamientos de riego se realicen conforme a lo planificado; en este sentido se debe observar las dinámicas y variaciones en la humedad del suelo, la cantidad de agua aplicada, y la presión de riego en cada riego. Este monitoreo, además de brindar información sobre el desarrollo del tratamiento, también permite identificar fallas o roturas en el sistema de riego por goteo.

Las estaciones de medición en el campo brindan un gran volumen de información en términos temporales, pero dicha información es registrada solamente en ocho lugares representativos del olivar. Es necesario complementar el análisis temporal con un análisis sobre la variabilidad espacial de toda la zona cultivada.

Es por ello que, en forma conjunta, cada 14 días se realizó la inspección y análisis de los mapas con índices del cultivo con el fin de observar la variabilidad espacial dentro de cada tratamiento, como así también detectar síntomas de estrés o dificultades en el desarrollo del olivo que requieran mayor atención.

Como es de apreciarse, la planificación del riego es permanente durante la campaña y de forma cíclica. Es decir que, primero se determina la programación del riego, segundo se ejecuta el programa de riego, tercero se monitorea y evalúa el riego aplicado, y finalmente se calcula y ajusta (en caso necesario) el próximo turno de riego.

3. Resultados preliminares

A continuación, se presenta la información más relevante recopilada durante los primeros meses de uso de las distintas herramientas de Agricultura Digital, que han permitido la monitorización permanente de las variables de interés y la gestión de las estrategias de riego implementadas en el olivar superintensivo.

Las mediciones obtenidas con las estaciones de campo han permitido ajustar y adecuar la programación del riego en cada parcela acorde a la estrategia implementada. En la siguiente figura se presenta la información recopilada en la humedad del suelo a 30 cm de profundidad, esto forma parte del monitoreo continuo de la planificación del riego. Así mismo, el monitoreo de la cantidad, caudal y presión de riego en cada parcela permitieron verificar la aplicación completa de la programación del riego.

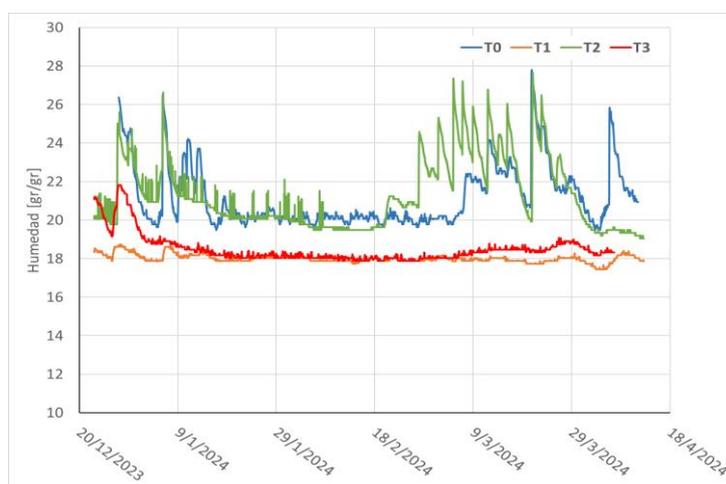


Fig. 7. Medición de la humedad del suelo (a 30 cm) en cada tratamiento de riego.

En el presente estudio la inspección y análisis de la variabilidad espacial se efectuó sobre los distintos mapas del cultivo generado a partir de las imágenes térmicas y multiespectrales capturadas con el dron, presentados en la figura 8. Para el análisis de la información contenida en los mapas se requiere previamente extraer solamente las zonas con cultivo. A tal fin, se ha generado una máscara de corte a partir del mapa de NDVI del cultivo y se define el umbral de corte en $NDVI > 0.7$ (figura 8.a).

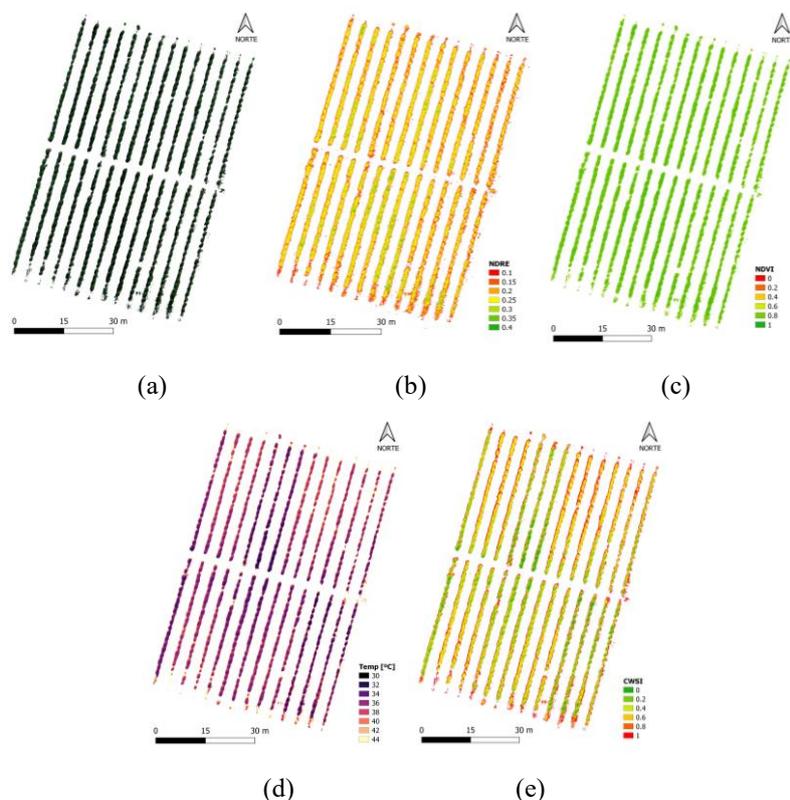


Fig. 8. Mapas de la zona cultivada reconstruido en base a las imágenes térmicas y multiespectrales. (a) Capa de corte para extraer la zona cultivada dentro del ensayo. (b) Índice NDRE. (c) Índice NDVI. (d) Mapa de temperatura del cultivo (T_c). (e) Índice CWSI.

Las condiciones de crecimiento y desarrollo foliar de los olivos en cada tratamiento se analizaron con la información extraída de los mapas de NDRE y NDVI (figura 8.b y 8.c respectivamente). Mientras que las condiciones del estado hídrico se analizaron a partir de la determinación de la temperatura de la cobertura del cultivo (T_c) dentro de cada parcela con el mapa termográfico mostrado en figura 8.d y, en base a esta información, con la reconstrucción del mapa de CWSI. El CWSI toma valores entre 0 y 1 indicando condiciones bien regadas o con déficit hídrico, respectivamente.

En un procesamiento fuera de línea, se calculan los valores promedios de NDRE, NDVI, T_c y CWSI para cada parcela y tratamiento de riego. Estos valores son correlacionados con las mediciones de Ψ_h y la conductancia estomática efectuadas manualmente en los olivos de referencia. Con este procedimiento de correlación se logra estimar el estado hídrico en todas las plantas de olivo y el análisis general de cada tratamiento. En el presente trabajo no se publican los valores de Ψ_h y la conductancia estomática medidos y las respectivas correlaciones por ser objeto de otra publicación que incluye el análisis agronómico del olivar. En [18] se presenta una investigación durante la campaña anterior, en la cual se aborda el análisis de la variabilidad espacial y la correlación de las variables mencionadas.

Es importante destacar que, con el uso de todas las herramientas disponibles, en este trabajo se ha logrado realizar el seguimiento preciso de cada tratamiento de riego y, a su vez, la monitorización permanente del cultivo en cada parcela prestando especial atención en los periodos críticos del crecimiento del olivo en donde las condiciones de riego y de estrés hídrico afectan al cultivo. Todos los efectos que se han presentado en el desarrollo de los olivos, positivos y negativos, han sido estrictamente documentados a fin de lograr el análisis minucioso sobre la adaptación de un sistema de olivo superintensivo en la región.

5. Conclusiones

Con esta experiencia se puede demostrar que es posible aplicar nuevas herramientas tecnológicas de Agricultura Digital para gestionar adecuadamente la programación del riego como una forma de mejorar su eficiencia y correcta aplicación. En regiones con escasez de agua como es el caso del provincia de San Juan, estas tecnologías podrían aumentar la eficiencia hídrica y productividad de las zonas cultivas bajo riego.

El sistema de Telemetría Agrícola y las estaciones de medición de variables en el campo, desarrollados en el Instituto de Automática (INAUT), ha funcionado adecuadamente en la primera etapa de experimentación. Ha sido posible recopilar información relevante (en ocho parcelas agrícolas) sobre el funcionamiento del sistema de riego por goteo, uso del agua, variables climáticas y desarrollo del cultivo. Se espera extender esta experiencia a olivares de mayor superficie y comerciales que posean sistemas de riego complejos.

La información recopilada ha permitido monitorizar diferentes variables asociadas al intersistema suelo-riego-cultivo-clima y con ellos gestionar la programación del riego de manera adecuada y oportuna con el fin de ensayar cuatro tratamientos de riego que permitirán estudiar y determinar las mejores condiciones de adaptación del cultivo de olivo con marcos de plantación superintensivos.

Las estaciones de medición instaladas en campo han permitido evaluar la variabilidad temporal de cada tratamiento de forma adecuada mediante el registro continuo (cada 10 minutos) de las variables de interés. Mientras que el análisis de la variabilidad espacial de cada parcela (en particular las condiciones de estrés hídrico) se logró con la construcción de mapas de alta resolución generados con imágenes multiespectrales y termográficas, que fueron recopiladas con cámaras aerotransportadas en un dron cada 14 días. Las herramientas tienen aplicaciones potenciales en la detección del estrés hídrico, monitoreo en el crecimiento de los olivos, y ajustes en la programación del riego, todo ello en el contexto de la agricultura de precisión.

Agradecimientos. El presente trabajo ha sido soportado mediante proyectos financiados por: el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina, la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Agencia I+D+i) de Argentina.

Referencias

1. Searles P., Agüero Alcarás M., Rousseaux M.: El consumo de agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21, 15-28 (2011).
2. Connor D. J., Gómez del Campo M., Rousseaux M. C., Searles P. S.: Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: a review. *Sci. Hortic.* 169, 71–93 (2014).
3. Pastor M., García Vila M., Soriano M. A., Vega V., Fereres V.: Productivity of olive orchards in response to tree density. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 82, 555–562 (2007).
4. Moriana A., Orgaz F., Pastor M., Fereres E.: Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425–431 (2003).
5. 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).
6. Doorenbos J. y Pruitt W. O.: Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Roma, Italia. (1976)
7. Mulla David J.: Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering.*, 114(4), 358-371 (2013).
8. Gitelson A. A.: Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161(2), 165-173 (2004).
9. Colombo R., Bellingeri D., Fasolini D., Marino C. M.: Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment* 86(1), 120-131 (2003).
10. Idso S. B, Jackson R. D, Pinter Jr. P.J, Reginato R. J., Hatfield J. L.: Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24, 45-55 (1981).
11. Gonzalez-Dugo V., Zarco Tejada P., Nicolás E.: Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agric* 14, 660–678 (2013).
12. Ballester C., Zarco Tejada P. J., Nicolás E., Alarcón J. J., Fereres E., Intrigliolo D. S., Gonzalez-Dugo V.: Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precision Agric* 19, 178–193 (2018).
13. Capraro F., Tossetti S., Mut V.: Telemetría Agrícola. Un acercamiento hacia las nuevas tecnologías disponibles en riego de precisión. En: X Congreso de Agroinformática (CAI 2018) – 47 JAIIO. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina (2018).
14. Capraro F., Tossetti S., Rossomando F., Mut V., Vita Serman F.: Web-based system for the remote monitoring and management of precision irrigation: a case study in an arid region of Argentina. *Sensors* 18, 3847 (2018).
15. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith, M.: Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* Vol 56. FAO, Rome, Italy (1998).
16. López J., López M., Capraro F., Orozco E.: Desarrollo de nodos de medición multisensor para la gestión de sistemas de riego de precisión. En: XIX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2021. San Juan, Argentina (2021).
17. Gimenez R., Capraro F., Campillo P., Gentili L., Pierantozzi P.: Análisis de la variabilidad espacial del estado hídrico en un olivar superintensivo. En: XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC 2023. Misiones, Argentina (2023).
18. Scholander P. F., Bradstreet E. D., Hemmingsen E. A., Hammel H. T.: Sap Pressure in Vascular Plants, Negative hydrostatic pressure can be measured in plants, *Science* 148(3668), 339-346 (1965).