

## **Cálculo de CWSI en base a imágenes termográficas para el análisis de estrategias de riego deficitario en tomate**

Flavio Capraro, Santiago Tosetti, Javier Gimenez, Vicente Mut

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

{fcapraro, stosetti, jgimenez, vmut}@inaut.unsj.edu.ar

**Resumen.** El Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) es una herramienta adecuada para monitorear y cuantificar el estrés hídrico, como así también para programar el riego e identificar inconvenientes en los sistemas de riego. En el trabajo se presenta una revisión del CWSI y el cálculo del mismo en una parcela con cultivo de tomate con riego por goteo. El índice se determinó en base a la temperatura de la cobertura vegetal del cultivo, para ello se procesaron imágenes capturadas con una cámara termográfica FLIR VueProR 640 y una cámara multiespectral MicaSense RedEdge, ambas montadas en un dron. A fin de lograr distintas condiciones de estrés en el cultivo se implementaron tres tratamientos de riego (reposición del 100%, 70% y 40% del consumo durante el periodo de invierno a cosecha). La realización de un mapa georreferenciado de CWSI permitió concluir que dicho índice resulta ser un indicador sensible y adecuado para identificar sectores con estrés en el cultivo del tomate. Las mediciones de temperatura realizadas en cada parcela mostraron diferencias mayores para los tratamientos de riego deficitario en comparación con plantas bien regadas (4°C en estrés moderado y superiores a 7°C en estrés severo); así mismo, en el análisis de la producción se observó que el rendimiento y calidad disminuyeron ante las condiciones de estrés hídrico. El ensayo se realizó en la provincia de San Juan, Argentina, región de clima desértico y dependiente del riego.

**Palabras claves:** Estrés Hídrico, Termografía, Riego de Precisión, Horticultura.

### **1 Introducción**

En la provincia de San Juan, ubicada en la región de Cuyo al oeste de Argentina, los procesos agrícolas son dependiente del riego debido a la alta demanda hídrica de los cultivos y al reducido aporte de agua por lluvia que se dan en época estival (90 a 110 mm anuales) [1]. En las últimas dos décadas, los productores han tecnificado los sistemas de riego incorporando equipos de riego presurizado (por goteo, aspersión, cinta exudante) para lograr el mayor aprovechamiento del agua; con ello se logra optimizar el rendimiento del uso del agua, ya que la aplicación de la misma es localizada y la programación del riego se establece para cubrir las necesidades del cultivo [2].

En el orden local, se ha identificado la necesidad de incorporar nuevas tecnologías

de gestión del riego que favorezcan el desarrollo de una agricultura moderna y lograr el uso eficiente del agua destinada a riego, con el objetivo de aumentar la productividad del uso del agua [3]. Para alcanzar la máxima productividad del lote o parcela, es necesario (entre otras cosas) conseguir alta homogeneidad en calidad y cantidad de producto, lo cual puede verse afectada seriamente por: problemas de manejo del riego, aplicaciones erróneas de la cantidad de riego (derivadas del cálculo impreciso de la demanda hídrica del cultivo o por la falta de información climática que permiten establecer la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)); o por daños ocasionados en el sistema de distribución (cañerías rotas, taponamiento de goteros o aspersores, rotura de válvulas, etc.) los cuales son difíciles de detectar dentro de la parcela.

Para conocer y analizar la uniformidad del lote o parcela bajo riego, es conveniente utilizar herramientas digitales que proporcionen información sobre el estado hídrico de los cultivos mediante el cálculo de un indicador o índice plasmado en un mapa o mosaico georreferenciado. Los índices se calculan a partir de la información contenida en imágenes termográficas y multiespectrales de alta resolución, capturadas con cámaras especiales que suelen estar montadas en satélites, aviones o drones [4-6].

La temperatura del dosel vegetal o cobertura del cultivo (T<sub>c</sub>) es considerada como un indicador de la disponibilidad de agua de la planta [7]. Los recientes avances tecnológicos en sensores de temperatura por infrarrojos y de cámaras termográficas de alta resolución posibilitan la adquisición de información de la temperatura de una superficie y facilitan el mapeo de la temperatura del cultivo en la parcela. El mapeo puede realizarse a varias escalas, desde una pequeña área local (orientando un termómetro infrarrojo) hasta grandes superficies a nivel regional (imágenes de satélite).

Uno de los métodos más utilizados para conocer el estado hídrico del cultivo es el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI), acrónimo de Crop Water Stress Index, propuesto por Idso et al. [8]. El mismo se basa en la temperatura del cultivo y en las condiciones meteorológicas. El CWSI tiene un rango de valores normalizado (entre 0 y 1) lo cual indica un rango de situaciones bien regadas a estresadas, en relación a condiciones extremas designadas por las temperaturas de referencia T<sub>wet</sub> y T<sub>dry</sub>. El índice será abordado en mayor detalle en la sección de Métodos y Materiales.

El cálculo del CWSI requiere conocer la temperatura de la cobertura del cultivo; la cual puede determinarse por medición directa sobre plantas individuales con el uso de termómetros orientados al cultivo o mediante imágenes termográficas capturadas con cámaras de mano [9]. Mientras que, para monitorizar un lote o una parcela, se utilizan cámaras termográficas de alta resolución y de bajo peso montadas sobre drones o aviones. En [10] se realizó el cálculo del CWSI para detectar zonas con estrés hídrico en cinco cultivos de árboles frutales con diferentes tratamientos de riego. Cuando el análisis se realiza en una región, será conveniente usar imágenes termográficas provista por satélites, lo cual conlleva una reducción en la resolución espacial.

En el presente trabajo se efectúa el cálculo del CWSI en una parcela de cultivo de tomate con riego por goteo con el objetivo de analizar la variabilidad del CWSI y, en base a ello, identificar condiciones de estrés ocurridos por problemas asociados a la programación del riego o por fallas de funcionamiento de los equipos. Para ello, fue necesario abordar el estudio desde los aspectos tecnológicos y agronómicos. Desde el

enfoque tecnológico los objetivos consistieron en: registrar diferentes variables en el campo utilizando estaciones de medición automáticas, capturar una serie de imágenes termográficas y multiespectrales desde un dron, y diseñar programas informáticos que permitan automatizar el cálculo del CWSI y presentar los valores en un mapa georreferenciado. Desde el enfoque agronómico se realizaron tres tratamientos de riego deficitario controlado (RDC) con el objetivo analizar el rendimiento productivo y conocer los valores de temperatura y de CWSI para distintas condiciones de estrés.

### **1.1 Análisis de situación local**

El tomate es una de las hortalizas más importantes en el mundo; su consumo aumenta y con ello la superficie cultivada, la producción y la comercialización [11]. Anualmente se producen en el mundo más de 150 millones de toneladas, siendo el 25% destinado a la industrialización. Más del 70% del tomate para industria se utiliza en la obtención de pasta; el resto es para conservas, jugo, salsas y deshidratados [12].

Argentina aporta el 1% de la producción mundial. Las principales provincias productora son Mendoza y San Juan, logrando el 44% y 28% de la producción respectivamente. En Mendoza, los productores nucleados en la Asociación Tomate 2000 cosechan 63 toneladas promedio por hectárea; mientras que, en San Juan, los productores de Tomate 2000, cosechan 104 toneladas por hectárea [13]. El incremento de los rendimientos se debe a la incorporación de un paquete tecnológico que incluye: preparación de suelo, selección de cultivares, sistemas de riego por goteo, fertilización asistida, control de plagas y enfermedades [14]. Dado que el tomate es un producto comoditie, el aumento del rendimiento es fundamental para ganar competitividad [13]. El estrés hídrico reduce significativamente la productividad del lote, ello remarca la importancia de incorporar nuevas herramientas de gestión del manejo del cultivo y programación del riego para detectar de manera temprana zonas estresadas.

En San Juan se obtiene el mayor rendimiento nacional (a campo), incluso comparándose a otras partes del mundo, como ser en la Región Metropolitana de Chile [15] o en Extremadura, España [16]. Sin embargo, la concentración de sólidos solubles es insuficiente (del 4,7°Brix) siendo que se requiere una concentración de 5°Brix [11]. Según se analiza en [17], el máximo rendimiento y calidad en la producción hortícola sólo puede obtenerse si se generan tecnologías adaptadas a las condiciones de suelo, cultivo y clima de cada lugar. Ello motivó el inicio de nuevas investigaciones, como ser el cálculo del CWSI, que permitan mitigar los efectos del estrés hídrico en el cultivo de tomate con destino a industria en San Juan [18].

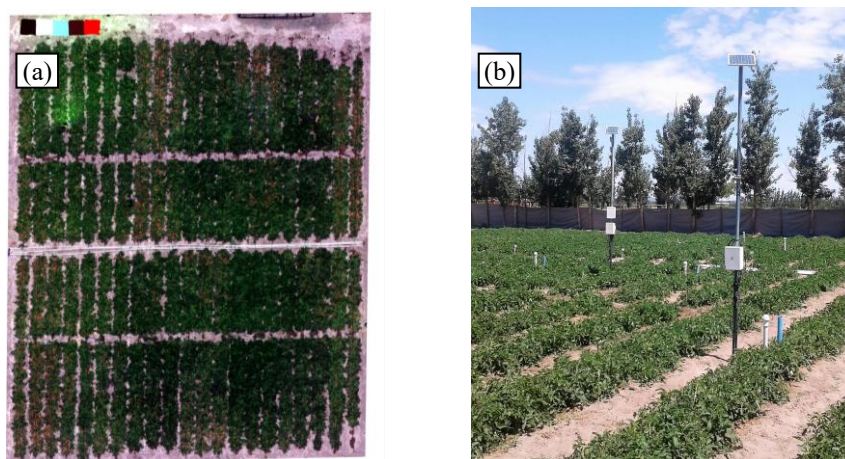
## **2 Métodos y materiales**

### **2.1 Descripción del experimento a campo**

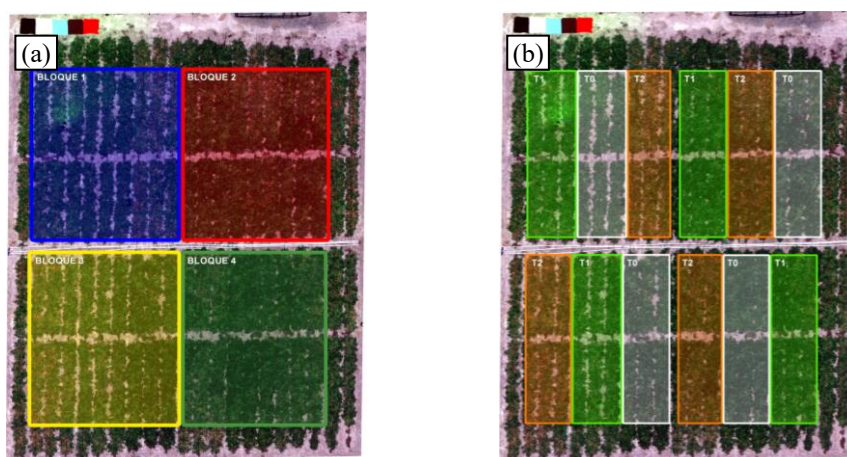
El ensayo a campo se ha realizado en un cuadro de tomates con destino a industria

(figura 1), localizado en la estación experimental de INTA San Juan (coordenadas 31° 29' 27'' S; 68° 35' 13'' O). El periodo de ensayo fue de 120 días, inició con la implantación de plantines el día 20/09/2017 y culminó con la cosecha el día 18/01/2018. La separación entre hileras fue de 150cm y entre plantas 29 cm. El diseño estadístico consistió en dividir el cuadro en cuatro bloques (figura 2,a), subdividido en 3 parcelas indicadas en la figura 2,b. En cada parcela hay tres hileras de 14 m de longitud.

Se instaló un sistema de riego por goteo, con emisores de 1,05 L/h de capacidad y separación de 30cm, con un lateral porta-emisores por cada hilera de plantas. El sistema de riego se subdividió en tres unidades para lograr el riego diferenciado de cada tratamiento. La tasa de precipitación bruta (Pr) del sistema de riego es de 2,33 mm/h.



**Fig. 1.** Parcela experimental de cultivo de tomate con destino a industria con riego por goteo. (a) Imagen aérea de la zona cultivada. (b) Ensayo luego de transcurrido 40 días de avance.



**Fig. 2.** Diseño estadístico del ensayo de riego. (a) Demarcación de cuatro bloques de experimentación. (b) Demarcación de 12 parcelas (tratamiento de riego aplicado T0, T1 y T2). [18]

## 2.2 Gestión del riego y tratamientos de riego deficitario controlado

La programación del riego se determinó a fin de reponer el 100% de las necesidades hídricas del cultivo (ETc) [2], en base a la evapotranspiración de referencia (ET0) diaria y al coeficiente de cultivo (Kc) sugeridos en [14], según (1).

$$ETc [mm] = ET0 * Kc \quad (1)$$

A partir de la época de envero (día 12/12/2017) hasta el momento de la cosecha (día 18/1/2018) se realizaron tres tratamientos de riego, según se indica:

**T0:** Tratamiento testigo. Reposición del 100% de la ETc consumida.

**T1:** tratamiento con riego deficitario controlado 1. Reposición del 70% de la ETc.

**T2:** tratamiento con riego deficitario controlado 2. Reposición del 40% de la ETc.

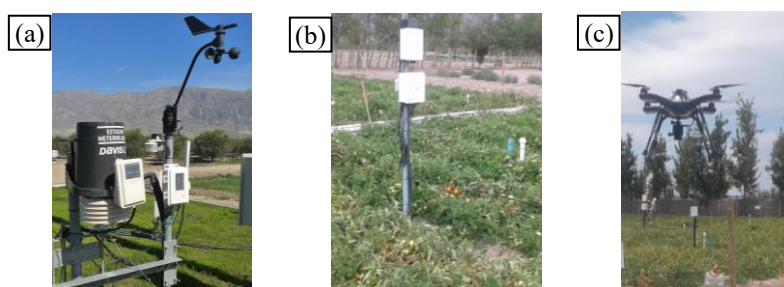
Mayores detalles sobre la programación del riego se presentan en [18].

## 2.3 Mediciones en campo

Durante la campaña se efectuaron de manera sistemática mediciones de potencial y conductancia estomática sobre plantas ubicadas en la línea central de la parcela y en el tramo central (5 m) de dicha hilera, lo cual corresponde a la evaluación de 17 plantas por parcela. También se tomaron muestras de suelo a 20, 40 y 60cm para conocer el nivel de humedad gravimétrica real del suelo.

En cercanías del ensayo se instaló una estación agrometeorológica marca Davis, modelo Ventage Pro II (figura 3.a), para registrar las variables climáticas y estimar la ET0 horaria requerida para determinar las aplicaciones del riego de cada tratamiento.

En el bloque 1 se instalaron 3 estaciones de medición para monitorizar el avance de cada tratamiento de riego (figura 3.b). Cada estación posee un registrador de datos, 3 sensores de humedad de suelo (Decagon EC-5) situados a 20, 40 y 60cm de profundidad, un sensor de presión insertado en el lateral de riego, un sensor de temperatura y humedad ambiente a 150cm sobre el nivel de suelo, y un caudalímetro de turbina insertado en la línea de riego para contabilizar el agua suministrada a la parcela.



**Fig. 3.** Equipamiento utilizado. (a) Estación meteorológica automática. (b) Estación de medición de variables en campo. (c) Cuatrirrotor autónomo equipado con una cámara termográfica.

Todas las variables medidas en la estación meteorológica, en las tres estaciones de medición en campo, y en el equipo de riego se registraron cada 10 minutos. El seguimiento en tiempo real de las mismas se realizó desde la plataforma web “Telemetría Agrícola” [18] (<http://telemetria.inaut.unsj.edu.ar/inicio/>).

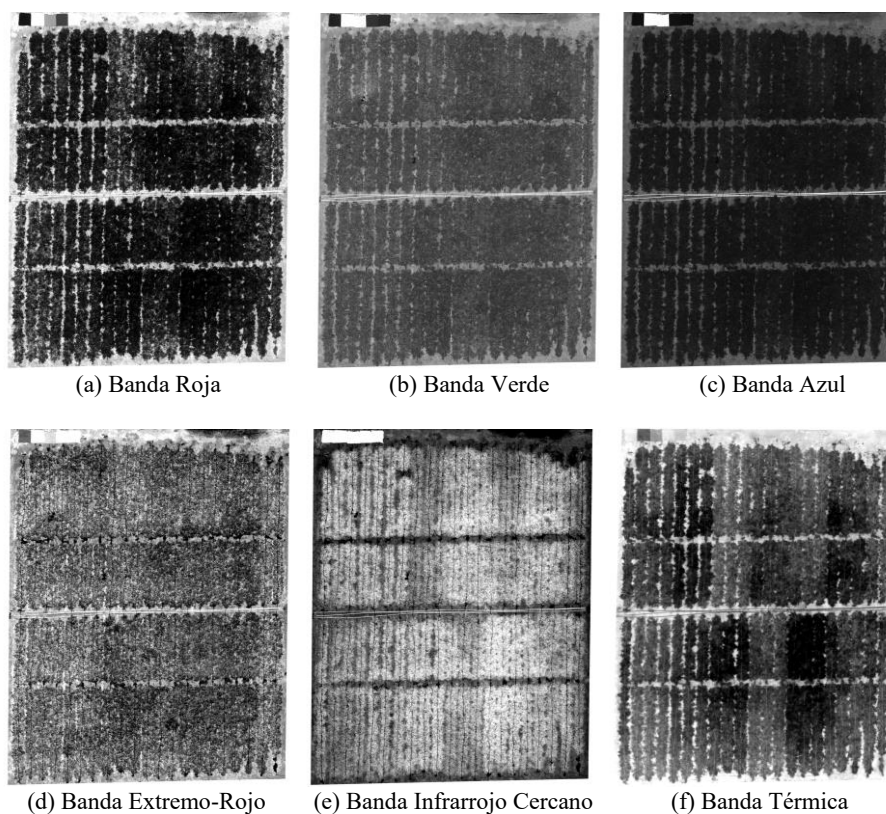
La adquisición de las imágenes de la zona cultivada se realizó con una cámara termográfica Flir VueProR 640 y una cámara multispectral Micasense RedEdge (5 bandas) montadas en un dron modelo Solo, de 3DR Robotics (figura 3.c). Al inicio del vuelo se tomaron imágenes de un panel de calibración (patrón) para ajustar los valores de temperatura y reflectancia en la etapa de procesamiento de imágenes.

#### 2.4 Adquisición de las imágenes y metodología de procesamiento

En el presente trabajo, se ha realizado el cálculo del CWSI en base a la información de imágenes termográficas y multispectrales obtenidas el día 28 de diciembre de 2017 (corresponde a 16 días de transcurrido los tratamientos T1 y T2). El vuelo se inició a las 13:50hs, a la altitud de 40m, velocidad de 5m/seg, y solapamiento de imágenes 80% vertical y 80% horizontal. La duración del vuelo fue de 10 minutos aproximadamente. La temperatura ambiente fue de 36°C y la humedad relativa del 41%. Al mismo tiempo se realizaron los muestreos y mediciones requeridos en cada bloque.

La primera etapa del procesamiento consiste en fusionar las imágenes para lograr un mapa u ortomosaico de los dos conjuntos de imágenes (un set con imágenes termográficas y otro set con imágenes multispectrales). Posteriormente se ajusta la posición y orientación del ortomosaico con puntos de control en tierra (GCP) georeferenciados de manera precisa. Los GPC son marcas o puntos en el terreno con coordenadas geográficas conocidas que deben estar dentro de la zona fotografiada. Para culminar, se debe realizar el ajuste de los niveles de reflectancia y de temperatura mediante las respectivas curvas de calibración. Este procesamiento se ha realizado con el software Pix-4Dmapper, versión 4.4 [19], bajo la licencia de prueba. En la figura 4 se presentan los seis mapas de reflectancia logrados.

Los ortomosaicos resultantes suelen presentar pequeñas diferencias de posición y orientación entre ellos. Por ello, se requiere efectuar un ajuste fino en la georreferenciación del mapa termográfico para lograr la alineación y coincidencia con las imágenes multispectrales de manera precisa. En el presente trabajo, la imagen termográfica es de menor resolución que las imágenes multispectrales. Para el ajuste se ha utilizado el software QGIS, versión 2.18 [20]; mediante el complemento de Georreferenciación de la herramienta GDAL [21]. Se utilizó de imagen base la fusión de los mapas de las bandas Rojo, Verde y Azul (RGB) de la cámara multispectral (figuras 4.a, 4.b, 4.c respectivamente), dicha fusión se presenta en la figura 1.a.. Se consideraron 10 puntos de control para la nueva georreferenciación de la imagen termográfica, lográndose la correcta alineación entre ambas imágenes. En caso necesario, es posible realizar el emparejamiento de la resolución entre las imágenes utilizando la herramienta *Calculadora Raster* en el software QGIS. Indicándose la nueva resolución mediante la definición de la *cantidad filas y columnas*, o de manera automática mediante el botón de *extensión a la capa actual*, la herramienta efectúa el ajuste.



**Fig. 4.** Ortomosaicos obtenidos al finalizar el procesamiento de reconstrucción (mapas de reflectancia): de (a) hasta (e) corresponden a las cinco bandas de la cámara multispectral Mica-Sense RedEdge, mientras que (f) corresponde a la cámara termográfica Flir Vue640R.

## 2.5 Temperatura del dosel vegetal del cultivo

El mapa térmico (figura 4.f) ha sido utilizado para calcular la temperatura del cultivo ( $T_c$ ) dentro de cada parcela. Solo es considerada la parte central de la parcela (17 plantas) para calcular la temperatura promedio a fin de evitar los efectos de borde.

El procesamiento de los mapas de temperatura y de bandas multispectrales fue realizado con algoritmos escritos en el lenguaje Python [22], Se integraron funciones de las librerías OsGeo, GDal, NumPy, SciPy, y Matplotlib. El editor de programación utilizado fue Spyder 4, que se encuentra en la plataforma Anaconda [23].

Se programaron algoritmos en Python para diferenciar y extraer los píxeles que únicamente contengan la vegetación en el mapa termográfico. Al mediodía solar los efectos de la proyección de las sombras del cultivo se reducen al mínimo y las imágenes térmicas se componen principalmente de: cobertura vegetal, suelo, y píxeles mixtos planta-suelo. Estos últimos se ubican en el borde límite del dosel vegetal con el

suelo formando un efecto denominado corona alrededor del cultivo, dicho efecto suele estar más acentuado en cultivos arbóreos como se presenta en [10].

Los píxeles correspondientes a la cobertura vegetal pueden separarse de diferentes formas. Una opción es trabajar con un filtrado por umbral solamente con el mapa termográfico; mientras que otra metodología consiste en diseñar una capa de corte generada a partir del análisis de otros mapas o bandas disponibles.

En la primera opción se debe realizar la separación de los píxeles de vegetación. Para ello se analiza un histograma bimodal generado a partir de la frecuencia de píxeles del mapa termográfico, donde se diferencia claramente dos picos correspondientes a la concentración de píxeles de temperatura del cultivo y del suelo (figura 5). Bajo esta metodología, en [24] se aplicaron tres reglas de filtrado para separar los píxeles correspondientes a la cobertura vegetal de olivos, considerando como factor de corte 1/2 (full width at half maximum, FWHM), 1/5 (FWFM) y 1/8 (FWEM) del valor de máxima frecuencia de temperatura del cultivo. La metodología presenta la ventaja de ser sencilla, pero requiere de un análisis posterior a la etapa de filtrado para ajustar el umbral de corte de manera conveniente y lograr la separación de píxeles; dicho valor de umbral no debe generalizarse en futuros procesamientos u otros cultivos.

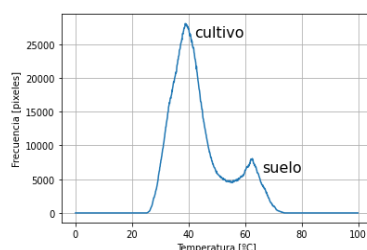
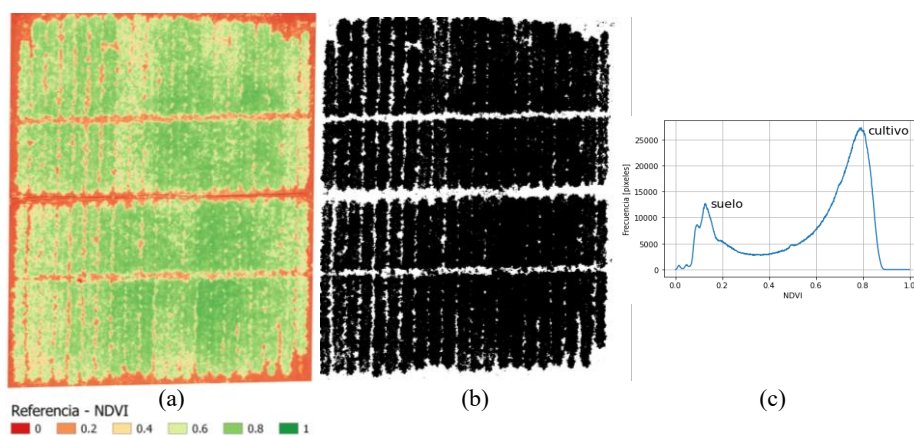


Fig. 5. Histograma bimodal obtenido del ortomosaico de temperatura del área cultivada.

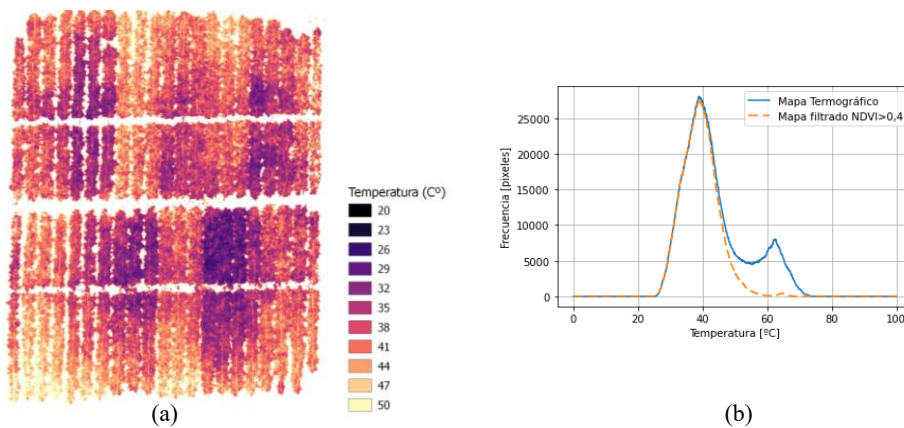
En la segunda metodología se emplea una capa (o lienzo) de corte generada a partir del cálculo de un índice de vegetación y definiendo un umbral de corte sobre el mismo, el cálculo requiere de los ortomosaicos de las bandas multiespectrales. En [25] se aplicaron diferentes umbrales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de un olivar intensivo para separar con éxito la vegetación de las sombras y los píxeles del suelo iluminados por el sol. En [26] se analiza la temperatura en el cultivo de papas, la separación de píxeles se realiza con una capa generada a partir un índice de vegetación que resulta de combinar imágenes en las bandas rojo, verde y azul ( $VI_{RGB}$ ). Esta metodología presenta ventajas frente a la primera; una de ellas, es que se eliminan con alta precisión los píxeles correspondientes a sombras, efecto corona, o píxeles de similar temperatura al cultivo pero que corresponden a objetos o cuerpos extraños no deseados en el análisis (cañerías de riego, suelo mojado, charcos de agua, vehículos, personal de campo, etc.). Como desventajas a la primera opción, se debe contar con información de otras bandas para calcular la máscara de corte. Además, para que el corte sea exitoso y preciso, debe existir alta coincidencia de alineación y emparejamiento entre los ortomosaicos, la máscara y la imagen a recortar.



En el presente trabajo, para lograr la separación de píxeles con vegetación, se ha generado una máscara de corte a partir del mapa de NDVI del cultivo (figura 6.a). En el histograma bimodal (figura 6.b) se observó que la concentración de píxeles correspondientes a la cobertura del cultivo y del suelo es notoria, estableciendo de manera empírica el umbral de corte en  $NDVI > 0.4$ . La capa de corte resultante (figura 6.c) ha sido utilizada para lograr el recorte de la imagen termográfica, presentada en la figura 7; en la misma figura se grafica en simultaneo el histograma de la imagen termográfica completa y recortada a fin de identificar el filtrado de los píxeles del suelo.



**Fig. 6.** Índice de vegetación de la zona cultivada. (a) Mapa NDVI. (b) Histograma bimodal del mapa NDVI. (c) Mascara o lienzo de corte conteniendo los píxeles de  $NDVI > 0.4$ .



**Fig. 7.** Ortomosaico termográfico. (a) Imagen recortada en base a la capa  $NDVI > 0.4$ . (b) Histogramas del ortomosaico termográfico completo y del ortomosaico recortado.

## 2.6 Cálculo del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI)

El CWSI se basa en la diferencia entre las temperaturas de la hoja y del aire normalizadas a la variación en las condiciones meteorológicas ambientales [8]. Jackson y colaboradores, en [27] definen al CWSI como la diferencia entre la temperatura del aire ( $T_a$ ) y del dosel vegetal del cultivo ( $T_c$ ) normalizado para la demanda evaporativa, determinado por medio de un límite inferior (cultivo en que el dosel transpira a su velocidad potencial con los estomas totalmente abiertos) y un límite superior (dosel que no transpira con los estomas completamente cerrados), como se muestra en la ecuación 1. Los límites superior e inferior se denotan con UL y LL, respectivamente.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad (1)$$

Otra representación similar, es dada por Jones [28]. El CWSI se define entre las temperaturas límites superiores e inferiores,  $T_{dry}$  y  $T_{wet}$ , que representan una hoja en estado de no transpiración y una hoja en estado completamente transpirando, respectivamente, como se observa en la ecuación 2. Las temperaturas de referencia,  $T_{dry}$  y  $T_{wet}$ , pueden establecerse de manera empírica, teórica o estadística [26][29].

$$CWSI = \frac{T_c - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (2)$$

El CWSI toma valores entre 0 y 1 indicando condiciones bien regadas o de déficit hídrico, respectivamente.

Para el cálculo del índice se empleó la ecuación 2. Las temperaturas de referencia fueron:  $T_{dry} = T_{aire} + 3^\circ\text{C}$  (según [30]) y  $T_{wet} = 29^\circ\text{C}$ . La temperatura  $T_{wet}$  ha sido estimada como el promedio del 5% de los píxeles más fríos contenidos en el mapa termográfico recortado (según se realizó [10]), mientras que  $T_c$  se obtiene de cada píxel del mismo mapa. Seguidamente se muestra el mapa de CWSI resultante.

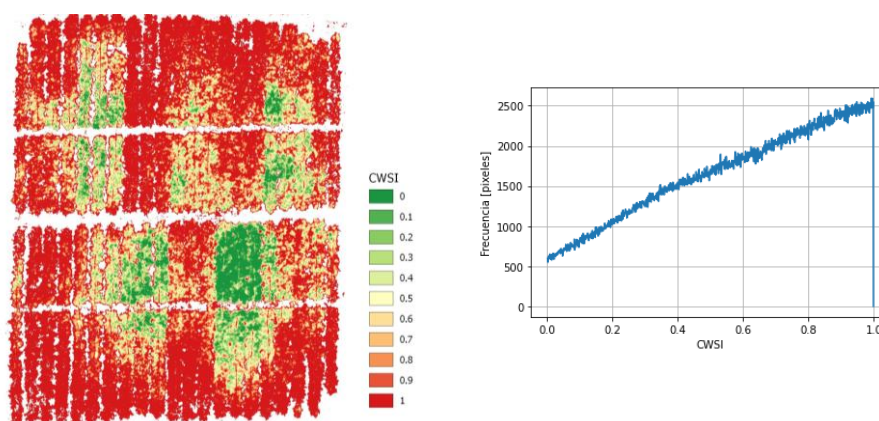
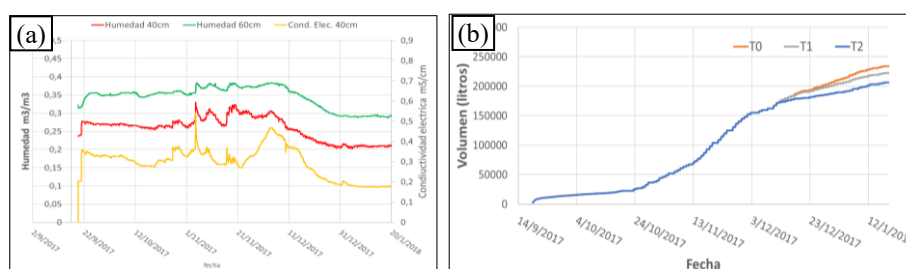


Fig. 8. Mapa CWSI del área cultivada con tomates e histograma.

### 3 Resultados

La programación del riego para cada tratamiento se efectuó en base a la demanda diaria de  $ET_c$  y con ello se estableció el tiempo de riego en cada parcela. El registro de la humedad del suelo a diferentes profundidades y la cantidad de agua suministrada en cada tratamiento permitieron asegurar la aplicación del riego (figura 9); diferenciándose al momento del inicio los tratamientos a partir de la fase de invierno.



**Fig. 9.** Seguimiento de las aplicaciones de riego. (a) Evolución de variables en el suelo en el tratamiento testigo (T0); nivel de humedad a 40cm y 60cm de profundidad, y conductividad eléctrica a 40cm de profundidad. (b) Cantidad de agua aportada en cada tratamiento de riego.

Analizando el mapa de termografía (figura 7) se observa mayor nivel de temperatura en los cultivos situados en las parcelas donde se efectuaron los tratamientos de RDC. Mediante el cálculo del CWSI es posible identificar las zonas con estrés hídrico de manera efectiva (figura 8). Respecto al mapa de NDVI se observa un marcado contraste entre la zona cultivada y el suelo; sin embargo, entre los tratamientos de riego no se observan diferencias significativas como en los mapas de temperatura y CWSI.

En la tabla 1 se presentan los resultados logrados en cada tratamiento (expresados en valores promedio) de temperatura, CWSI y NDVI agrupados por cada bloque. Al final de la tabla 1 se informa el valor promedio registrado en cada tratamiento considerando todo en cuadro de tomate. Toda la información recopilada permite el análisis de las diferentes condiciones de estrés y los efectos sobre la productividad.

En las parcelas de T0, donde el riego fue suministrado para cubrir la totalidad de la demanda y no se ocasionó estrés hídrico en el cultivo, se registraron los niveles más bajos de CWSI (0,4 en promedio en todo el cuadro y de 0,27 de promedio en el bloque 4), asociados a los registro de temperatura más bajos (33,8°C de promedio en todo el cuadro y de 31,9°C en el bloque 4); mientras que el nivel del NDVI en estas parcelas registran los niveles más altos (0,78 de promedio en todo el cuadro)

En las parcelas de T1, donde se redujo en 30% el aporte de riego, induciendo estrés hídrico leve en el cultivo, se registraron valores de CWSI promedio de 0.79 y en temperatura promedio de 37,7°C, ello corresponde a un incremento de 0,39 en CWSI y 3,9°C en temperatura en relación al T0. El nivel de NDVI promedio fue 0,74.

Mientras que en las parcelas de T2, lugar donde se redujo en 60% de riego y se indujo estrés hídrico severo en el cultivo, se registraron los valores más altos en el

CWSI promedio de 0,96 y en temperatura promedio de 40,7°C, esto corresponde a un incremento de 0,56 en CWSI y 6,9°C en temperatura promedio con relación al tratamiento testigo. El nivel del NDVI promedio fue 0,69.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos en los mapas termográfico, CWSI y NDVI. Valores promedio extraídos en cada parcela de riego: T0 (testigo 100% ETc), T1 (70% ETc) y T2 (40% ETc).

Bloque	Trat. Riego	Temp [°C]	CWSI	NDVI
<b>B1</b>	T0	33,6	0,43	0,74
	T1	38,5	0,86	0,70
	T2	40,6	0,98	0,64
<b>B2</b>	T0	35,6	0,60	0,77
	T1	36,8	0,71	0,79
	T2	39,7	0,93	0,74
<b>B3</b>	T0	34,2	0,47	0,78
	T1	36,5	0,74	0,71
	T2	41,9	0,99	0,64
<b>B4</b>	T0	31,9	0,27	0,82
	T1	39,0	0,87	0,76
	T2	40,6	0,94	0,74
<b>General (B1-B2-B3-B4)</b>	T0	33,8	0,44	0,78
	T1	37,7	0,79	0,74
	T2	40,7	0,96	0,69

**Tabla 2.** Resultados de la producción obtenida a fin de campaña (día 18/1/2018).

Trat. riego	Riego [mm]	Lámina [%]	Rendimiento [Tn/ha]	Dif. Rindes [%]	Tomates rojos [%]	Tomates defectos [%]	°Brix HM 7883	°Brix HM 1892
<b>T0</b>	648	100	143,1	-	86,6	13,34	5,33	5,65
<b>T1</b>	594	91,7	123,7	(-) 13	76,61	20,38	5,33	5,63
<b>T2</b>	537	83	106,2	(-) 26	71,97	28,02	5,5	5,98

Los resultados correspondientes a la productividad de cada parcela son presentados en la tabla 2. El rendimiento de fruto obtenido por hectárea en el tratamiento testigo ha sido satisfactorio (superando la media alcanzada a nivel local), mientras que se redujo significativamente en los tratamientos T1 y T2 en 13% y 26% respectivamente frente al testigo; de manera similar sucedió en la cantidad de frutos rojos. La concentración de sólidos solubles no presenta cambios significativos entre tratamientos, pero de manera satisfactoria superaron el valor requerido por la industria de 5°Brix.

Desde el aspecto tecnológico se han implementado exitosamente distintas herramientas de medición y estimación de variables que permitieron establecer las operaciones de riego de manera precisa durante toda la campaña. En particular, se destaca la realización de tratamientos de riego deficitario para lograr estrés hídrico en el cultivo de forma controlada. La variación de las condiciones de estrés en el cultivo del tomate ha sido claramente identificada mediante el análisis de la temperatura de la cobertura del cultivo y del CWSI. La metodología implementada para el cálculo del CWSI ha resultado adecuada, lográndose la generación de un mapa georreferenciado

del índice y su verificación como un indicador sensible a los efectos de estrés hídrico.

Desde el aspecto agronómico los resultados de productividad y calidad obtenidos en el tratamiento testigo han alcanzado niveles de excelencia, lo cual indica la importancia de realizar la programación del riego de manera precisa a fin de aportar la cantidad de agua requerida por el cultivo. De forma contraria, la ocurrencia de estrés hídrico en la última fase de desarrollo del tomate debido a la programación errónea y/o problemas en el equipo de riego disminuye el rendimiento y calidad.

En trabajos futuros se abordará el análisis de correlación entre la temperatura, CWSI y NDVI frente a los valores de conductividad eléctrica y potencial hídrico.

## 5. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para el cálculo del índice CWSI para la detección de estrés hídrico en el cultivo del tomate a partir del análisis de imágenes termográficas. La alta resolución espacial de las imágenes multiespectrales y termográficas recopiladas con cámaras aerotransportadas permitieron identificar espacialmente los efectos térmicos generados por el estrés hídrico ante diferentes niveles de riego.

Los resultados obtenidos en cada parcela demostraron que las variaciones de temperatura en la cobertura vegetal asociadas al estrés hídrico se logran detectar a nivel de planta, registrándose diferencias de temperatura mayores para los tratamientos de riego deficitario (T1 y T2) en comparación con plantas bien regadas (T0), con diferencias de 4°C durante estrés moderado y superiores a 7°C durante estrés severo.

El método presentado permitió la generación de un mapa de CWSI a nivel de cultivo a una resolución espacial de 2cm, mostrando la variabilidad espacial dentro de la zona cultivada para detectar zonas donde el cultivo se encuentra en situación de estrés. Este método tiene aplicaciones potenciales en la detección del estrés hídrico y la programación adecuada del riego en el contexto de la agricultura de precisión.

El rendimiento productivo y la calidad de los frutos fueron afectados en los tratamientos de riego con restricción hídrica durante la última fase de la campaña. Con ello se simuló situaciones de déficit generadas por el cálculo erróneo de la programación del riego y/o problemas de funcionamiento del sistema de riego.

### Agradecimientos

El trabajo se ha efectuado en marco del proyecto PIO N°84, "TELEMETRÍA AGRÍCOLA" financiado por CONICET y SECITI del Gobierno de San Juan y el proyecto "Desarrollo de una herramienta para la determinación de estrés hídrico en cultivos" línea CICITCA financiado por la Universidad Nacional de San Juan. Se contó con soporte de INTA EEA San Juan. Un especial agradecimiento a: Ing. Agr. Alfredo Olguín, Lic Daniela Pacheco, Tec. Hid. Mario Liota, Ing. Germán Babelis, Dr. Ing. Agr. Pierluigi Pierantozzi, Lic. Sonia Silva todos de INTA San Juan y al Ing. Agr. Agustín Recabarren de la Asociación Tomate 2000.

### Referencias

1. 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, pp. 23-45. (2010).

2. Doorenbos J. y Pruitt W. O.: Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia. (1976)
3. Pereira L. S., Cordery L., Iacovides I.: Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, vol 108, pp 39–51, (2012)
4. 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; DOI: 10.1007/s00271-014-0447-z (2015)
5. 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)
6. Vazquez P.: Comparación de índices de estrés hídrico a partir de información captada por el sensor MODIS, en la región pampeana argentina. *Cuadernos Geográficos*, Vol 52, No 1 (2013)
7. Gates D.M.: Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal* 56, pp 273–277. (1964)
8. Idso S.m Jackson, Ray; Pinter, Jr. Paul; Reginato, Robert y Hatfield, J.: Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability”. *Agricultural Meteorology*. 24, pp 45-55. (1981)
9. Agam N., Y. Cohen, J.A.J. Berni, V. Alchanatis, D. Kool, A. Dag, U. Yermiyahu, A. Ben-Gal: An insight to the performance of crop water stress index for olive trees. *Agricultural Water Management*, 118, pp 79-86 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.004>.
10. 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). <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9>
11. Mollinedo, V. A. y Tapia, A. C.: Fertilización del cultivo de Tomate. Estación Experimental de cultivos tropicales Yuto. INTA. (2008)
12. Noale, N.: Tomate para industria: revisión bibliográfica y selección de variedades en el Valle Medio de Río Negro. Tesis para optar al grado de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de La Plata. (2015)
13. IDR: Informe por especie: Tomate. Precios pagados a productor. Temporada 2014-2015 (2015).
14. Argerich, C.: Producción Integrada Tomate para industria. Directivas temporada 2015-2016. Asociación Tomate 2000. (2016)
15. Ferreyra Espada R. y García Huidobro J.: Riego del tomate: un déficit de agua en el cultivo hasta 28 días después de los riegos de establecimiento no afecta la producción. IPA La Platina N° 18, (1983)
16. CICYTEX: Manual práctico de riego para tomate de industria. Gob. de Extremadura. España. (2015)
17. Ortega-Farías, S.; Ben-Hur, L., Valdes, H., Paillán, H.: Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates de invernadero producido en primavera-verano. U de Talca. Chile. (2002)
18. Capraro F., Tosetti S., Mut V., Campillo P., Olgún A., Pacheco D.: Implementación del sistema “Telemetría Agrícola” para el manejo y análisis de estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de tomate. 11° Congreso Argentino de Agroinformática (CAI 2019). 48 JAIIO. Salta, Argentina. 2019.
19. Software de análisis de fotogrametría Pix4D Mapper. Disponible en: <https://www.pix4d.com/es>
20. Sistema de Información Geográfica libre QGIS: Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site/>
21. Interfaz de programación de aplicaciones GDAL. Disponible en: <https://gdal.org/api/index.html>
22. Python Foundation. Disponible en: <https://www.python.org/psf/>
23. Plataforma de desarrollo Anaconda. Disponible en: <https://www.anaconda.com/products/individual>
24. Egea G., Padilla-Díaz C. M, Martínez-Guanter J., Fernández J. E., Pérez-Ruiz M.: Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards, *Agricultural Water Management*, 187, pp 210-221 (2017)
25. Sepulcre-Cantó G., Zarco-Tejada P.J., Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., de Miguel E., Villalobos F.J.: Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery, *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(1–2), pp 31-44. (2006)
26. Rud R., Cohen Y., Alchanatis V., Levi A., Brikman R., Shenderey C., Heuer B., Markovitch T., Dar Z., Rosen C., Mulla D., Nigon T.: Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agric* 15, 273–289. (2014)
27. Jackson R., Idso S., Reginato R., Pinter P. J.: Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, pp. 1133–1138. (1981)
28. Jones H. C.: Plants and microclimate, 2nd ed.. Capítulo: Crop water stress index, pp. 293–295. Cambridge. Cambridge University Press. (1992)
29. Bellvert Rios J. El uso de la teledetección de alta resolución como herramienta para realizar un manejo eficiente del riego en viñedos. Tesis doctoral. Dpto. de Agronomía. Univ. de Córdoba. España. (2014)
30. López- López R., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A., López-Cruz I. L., Sánchez-Cohen I., Ruiz-García A.: Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Cha pingo. Serie horticultura*, 15(3), 259-267. (2009)