



USO DE IMÁGENES TÉRMICAS AÉREAS

1

en remolacha azucarera para propuesta de riego de precisión

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las necesidades hídricas del cultivo pueden variar dentro de una misma parcela debido a la variabilidad espacial del suelo. El riego de precisión tiene como objetivo desarrollar metodologías que posibiliten delimitar zonas de manejo uniformes dentro de las parcelas de cultivo y validar protocolos que permitan una programación precisa del riego en las distintas sub-unidades establecidas.

Desde hace más de 30 años se vienen acumulando evidencias sobre el potencial de la temperatura del cultivo para monitorizar el estado hídrico del mismo (Idso *et al.*, 1981; Jackson *et al.*, 1981). Las imágenes térmicas captadas desde los RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) ofrecen ventajas frente al uso de termómetros de infrarrojos

manuales (mucho trabajo y poca representatividad de las medidas) e imágenes térmicas satelitales (resolución espacial y temporal insuficiente para la mayoría de aplicaciones de riego). Para parcelas de pequeña/mediana extensión, estas plataformas aéreas pueden representar también una ventaja competitiva frente a plataformas de mayores dimensiones/autonomía, como pueden ser los aviones tripulados de gran envergadura portando sensores remotos.

El presente trabajo tiene, por tanto, el objetivo de evaluar la utilidad de imágenes térmicas procedentes de una cámara portada sobre un RPAS de pequeño tamaño para determinar variaciones en el estado hídrico del cultivo debidas a la variabilidad espacial del suelo y al manejo del riego con el fin de que puedan utilizarse como herramienta de ayuda para la gestión eficiente del riego en remolacha azucarera.

EGEA, G¹,
QUEBRAJO MOYA, L¹,
MARTÍNEZ, J¹,
PÉREZ-URRESTARAZU, L¹,
BERMEJO, JL²,
PÉREZ-RUIZ, M¹

1. Departamento Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Área de Ingeniería Agroforestal, ETSIA. Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera km.1, 41013. Sevilla. E-mail: gegea@us.es, lperez@us.es, manuelperez@us.es, martinezj@us.es, lquebrajo@us.es.

2. Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA). Departamento Técnico. Delegación Sur (Sevilla). Polígono Calonge, C/Metalurgia 36, 41007 Sevilla.



MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo durante la campaña 2014/2015 en una parcela comercial de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.var. saccharifera) con alta variabilidad espacial del suelo situada en la provincia de Cádiz (36,6965397° N, 6,3184375° W). La variabilidad del suelo se caracterizó mediante muestras de suelo georreferenciadas tomadas a distintas profundidades. El mapa de variabilidad del suelo permitió delimitar una zona de suelo arcilloso y otra de suelo arenoso. En cada zona se establecieron dos sub-parcelas de aproximadamente 150 m² que fueron equipadas con dos tubos de acceso para la monitorización del contenido de humedad del suelo en el perfil 0-100 cm (sonda PR-2, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK). Las medidas de humedad se normalizaron mediante el cálculo de la fracción de agua extraíble relativa (REW):

$$REW = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}$$

donde R es el contenido de humedad real y R_{max} y R_{min} los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez. En cada zona de estudio (arcillosa y arenosa), una sub-parcela se regó de acuerdo con el criterio del agricultor (siglas WW en adelan-

te) y otra fue sometida a dos periodos de déficit hídrico (siglas WS en adelante).

Durante la estación de riego y con frecuencia semanal/quincenal se realizaron vuelos con un RPAS (Phantom 2, SZ DJI Technology Co., Ltd.) equipado con cámara termográfica (Tau 2 324, FLIR, Oregon, USA). Las imágenes térmicas se tomaron al medio día solar, a una altura de 30 m y en días soleados. Posteriormente, se analizaron con un programa de segmentación de imágenes escrito en lenguaje R (R Development Core Team, 2015) que permitió extraer los píxeles de vegetación así como determinar la temperatura media del dosel vegetal (Figura 1).

La evaluación del estado hídrico del cultivo se realizó a partir de la diferencia entre la temperatura media de la cubierta vegetal y la temperatura del aire (DT). Los valores de DT fueron asimismo utilizados para determinar la integral de estrés durante el periodo de medida, para lo que se utilizó una expresión análoga a la propuesta inicialmente por Myers (1988):

$$S_{\Delta T} (^{\circ}C \text{ día}) = \sum_{i=0}^{i=t} (\Delta T_{i,i+1} - c_{i,i+1})n$$

donde t es el número de medidas de DT , $DT_{i,i+1}$ es la media de DT para cualquier intervalo $i, i+1$, $c_{i,i+1}$ es la media del menor valor

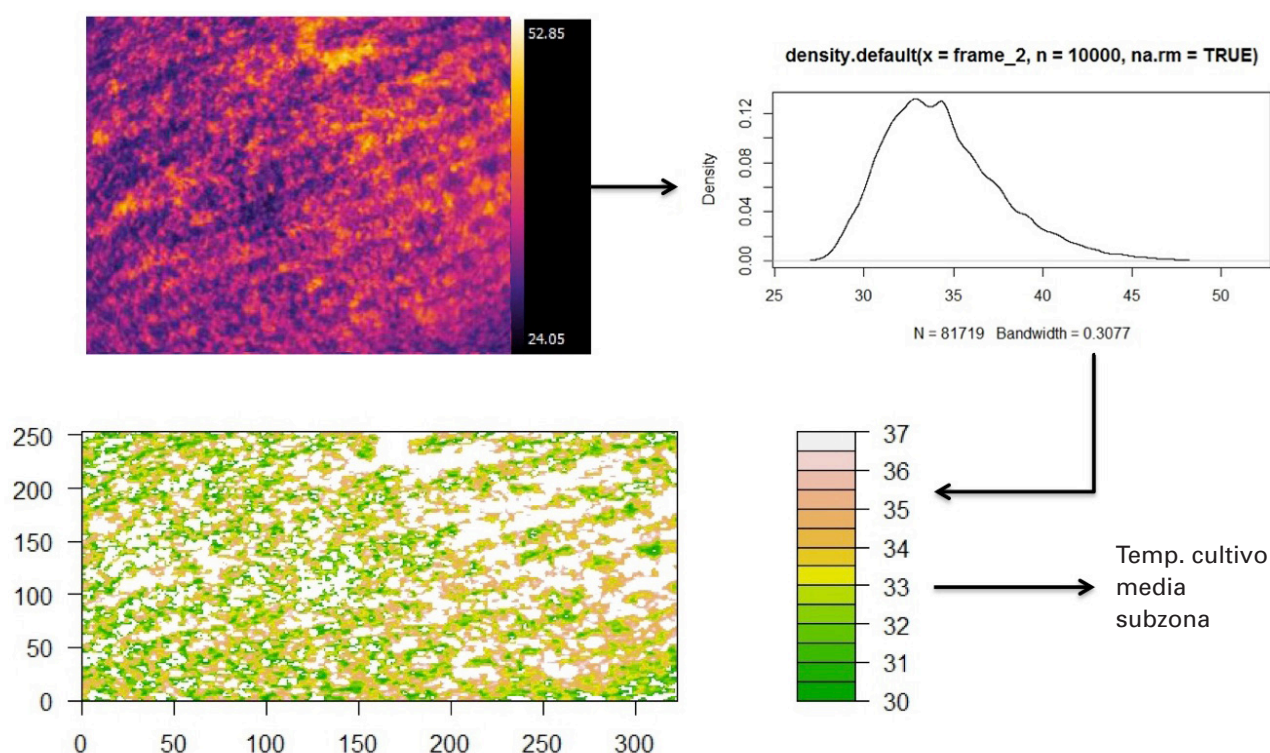


Figura 1. RPAS equipado con cámara térmica (izquierda). Ejemplo de procesamiento de termograma basado en el análisis del histograma de temperaturas (derecha).

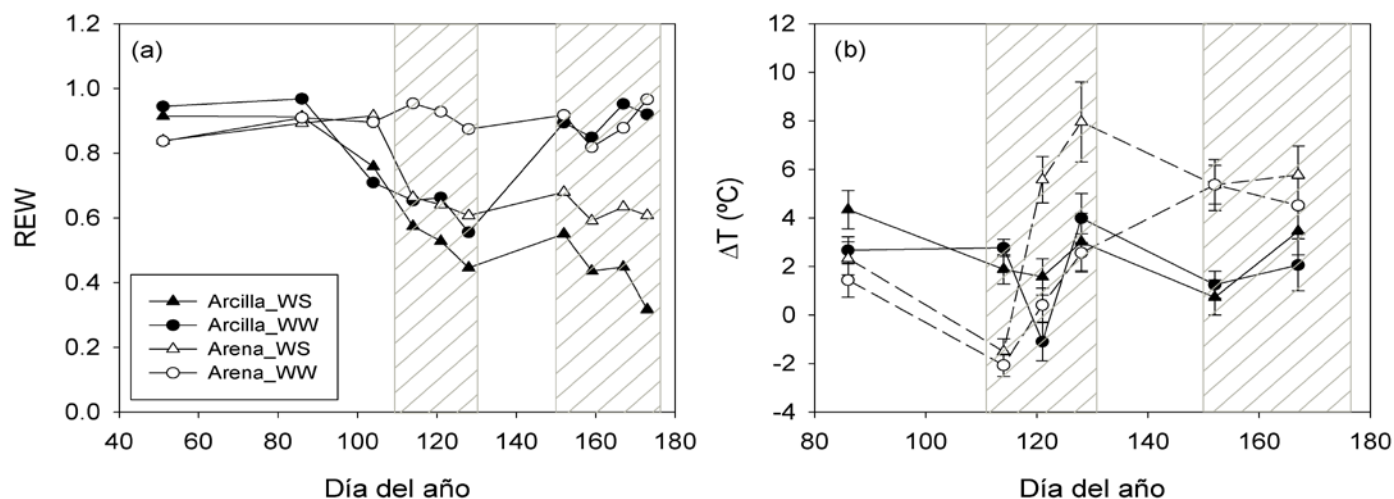


Figura 2. Evolución de (a) la fracción de agua extraíble en el perfil 0-100 cm (REW) y (b) la diferencia de temperatura entre la vegetación y el aire (ΔT) para las cuatro sub-parcelas de estudio. Las zonas rayadas representan los períodos de déficit hídrico.

de ΔT para cualquier periodo i , $i+1$ y n es el número de días en el intervalo. Los valores de c se obtuvieron a partir de la relación entre ΔT y el déficit de presión de vapor del aire en condiciones de no estrés obtenida por Idso (1982) para remolacha azucarera.

Al final del ciclo de cultivo (principios de julio) se llevó a cabo la recolección manual de las cuatro sub-parcelas de estudio. Las muestras recogidas se enviaron al laboratorio para el análisis de rendimiento, contenido de azúcar (t / ha), índice económico para el agricultor valorando los ingresos en remolacha tipo de 16° (IEA, t / ha 16°) y valor tecnológico e industrial de la remolacha (VTIR, %).

RESULTADOS

La dinámica de humedad en el suelo y las diferencias de temperatura cultivo-aire (ΔT) para las cuatro sub-parcelas se muestran en la Figura 2. En la sub-parcela Arena_WW se mantuvieron valores de REW próximos a 1 (condiciones de capacidad de campo) durante todo el periodo de estudio. En cambio, la sub-parcela Arcilla_WW presentó caídas de REW hasta valores próximos a 0.6 durante el período comprendido entre los días 80 y 125 aproximadamente, a pesar de haber recibido la misma programación de riego (dosis y frecuencias). La dinámica de REW en las sub-parcelas Arcilla_WS y Arena_WS fue similar a lo largo del periodo de estudio, si bien Arcilla_WS siempre mostró un valor de REW 15-20% inferior al observado en Arena_WS (Figura 2a).

ΔT permitió identificar variaciones en el estado hídrico del cultivo debidas tanto a una gestión del riego diferente como a la

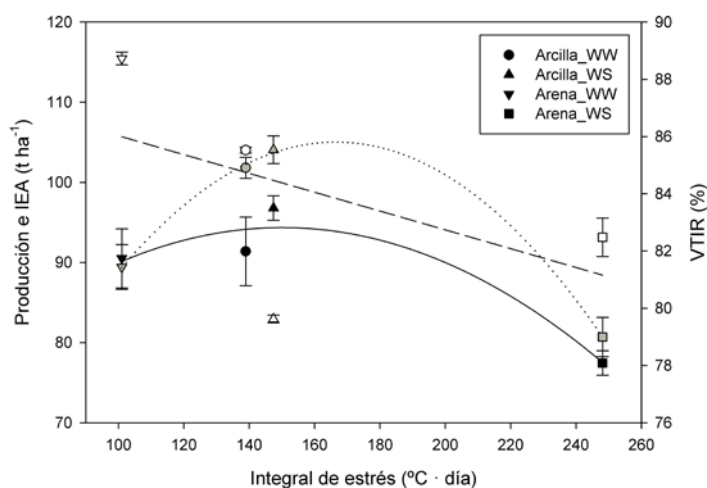


Figura 3. Relación entre la producción (símbolos blancos), IEA (símbolos negros) y VTIR (símbolos grises) con la integral de estrés determinada a partir de la temperatura de cubierta vegetal. Las líneas representan las regresiones entre integral de estrés y producción (discontinua), IEA (continua) y VTIR (punteada).



1 XXXXX.

2 RPAS Phantom 2.

3 XXXXX.

“ La temperatura del cultivo determinada de forma remota mediante un RPAS ha permitido determinar variaciones en el estado hídrico del cultivo debidas tanto a la variabilidad del suelo como al manejo del riego

variabilidad natural de las propiedades físico-químicas del suelo (Figura 2b). La comparación de la dinámica de DT con REW revela que no existe una clara similitud entre las dinámicas del estado hídrico del suelo y del cultivo, posiblemente porque la medida del contenido de humedad del suelo en un número limitado de puntos es insuficiente para representar adecuadamente la variación del estado hídrico del cultivo. Se puede observar que la producción mostró una tendencia linealmente decreciente con integral de estrés hídrico (S_{DT}) (Figura 3), si bien el tratamiento que menor producción mostró a pesar de no ser el que mayor S_{DT} alcanzó fue Arcilla_WS. Sin embargo, la IEA (Índice Económico del Agricultor, equivalente a ingresos brutos en remolacha de 16° de riqueza) obtenida en Arcilla_WS fue similar a la obtenida en las parcelas WW, por lo que la relación IEA vs S_{DT} mostró una tendencia decreciente a partir de un cierto umbral de S_{DT} , por encima del cual el indicador IEA no se vio afectado. VTIR también mostró una alta correlación con S_{DT} . Sin embargo, VTIR presentó una mayor influencia de la textura del suelo que IEA, ya que Arena_WW con niveles inferiores de S_{DT} mostró valores de VTIR (81.4%) inferiores a los de Arcilla_WW y Arcilla_WS (84.9 y 85.5%, respectivamente).

CONCLUSIONES

La temperatura del cultivo determinada de forma remota mediante un RPAS ha permitido determinar variaciones en el estado

hídrico del cultivo debidas tanto a la variabilidad del suelo como al manejo del riego. No se observó una relación directa entre el estado hídrico del suelo y el del cultivo, posiblemente por una ausencia de representatividad de los dos puntos de medida de humedad del suelo por sub-parcela. Tanto las sub-parcelas regadas según el criterio del agricultor como aquellas que fueron deliberadamente sometidas a periodos de déficit hídrico mostraron patrones de respuesta hídrica diferentes en función del tipo de suelo, confirmándose la necesidad de establecer programas de riego adaptados a la variabilidad espacial del terreno en las parcelas de remolacha altamente heterogéneas. Tanto la producción de remolacha tipo (IEA) como el valor tecnológico e industrial de la remolacha (VTIR) no se vieron afectados por el manejo del riego en la zona arcillosa, no ocurriendo lo mismo en la zona con textura arenosa.

AGRADECIMIENTOS

Desde el Laboratorio de Agricultura de Precisión de la Universidad de Sevilla queremos agradecer el esfuerzo y financiación tanto de las empresas (AGROSAP, TRIMBLE, etc.) como de las instituciones (AIMCRA, MINECO- AGL2013-46343-R, Junta de Andalucía -P12-AGR-1227, etc.) que nos permiten continuar trabajando en este apasionante mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric Meteorol* 24, 45-55.
- Idso, S.B. (1982). Non-water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric Meteorol* 27, 59-70.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resour Res* 17, 1133-1138.
- Myers, B.J. (1988). Water stress integral-a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiol* 4, 315-323.
- R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.