

Utilización del Crop Water Stress Index (CWSI) para la programación del riego en viñedos

J. Bellvert⁽¹⁾, J. Girona⁽¹⁾, J.P. Zarco-Tejada⁽²⁾ y E. Fereres⁽²⁾

(1) Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Tecnología del riego, Centre UdL-IRTA, 25198 Lleida, España. emails joaquim.bellvert@irta.es y joan.girona@irta.es

(2) Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Alameda del Obispo, s/n, 14004 Córdoba, España. email pzarco@ias.csic.es y aglfecae@uco.es

RESUMEN

El presente trabajo muestra una metodología para la detección del estado hídrico de un viñedo, utilizando imágenes térmicas de elevada resolución espacial mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Actualmente, un buen indicador del estado hídrico es el potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}), no obstante, la gran complejidad que comporta medirlo a gran escala en un espacio de tiempo limitado hace que sea inviable a nivel comercial. Se determinó el grado de correlación existente entre el ψ_{foliar} y la temperatura media del dosel vegetativo obtenida a partir de dos imágenes térmicas (9:00 y 12:00 horas GMT) en un total de 184 vides. Además se determinó el *Crop Water Stress Index* (CWSI) con el propósito de enmascarar el efecto de parámetros ambientales que pudiesen afectar la relación entre el estrés y la temperatura de la planta. Los resultados obtenidos mostraron una correlación del CWSI con el potencial hídrico foliar de $r^2=0.46$ y $r^2=0.71$ para las imágenes de las 9:00 y 12:00 GMT respectivamente, lo que demuestra la mejor viabilidad del uso de este índice como indicador del estado hídrico de la vid en el segundo vuelo. Así, a partir del modelo obtenido en las condiciones climáticas de la zona, se ha obtenido un mapa capaz de determinar las distintas zonas de la parcela en función del estado hídrico de la vid, con el propósito de posteriormente poder ajustar la programación del riego más eficientemente.

Palabras clave: estado hídrico, imágenes térmicas, UAV, potencial hídrico foliar

INTRODUCCIÓN

Un manejo del riego adecuado es el principal factor que afecta a los parámetros productivos y de calidad de la vid (*Vitis vinifera L.*). Aportaciones excesivas de agua, se traducen en mayores crecimientos vegetativos y productivos, pero pueden verse afectados negativamente parámetros cualitativos como el contenido en azúcares, formación de pigmentos o acidez (Van Leeuwen y Seguin, 1994, Schultz y otr. 2005). Por otro lado, se conoce que aplicar una estrategia de riego deficitario controlado en post enero en variedades tintas puede mejorar los parámetros de calidad, aumentando la concentración de sólidos solubles, acidez, antocianos o polifenoles (Girona y otr. 2006; Girona y otr. 2009; Esteban y otr. 1999). No obstante, con el propósito de conseguir una uva de calidad no solamente es importante que llegue al estado de madurez con unos parámetros determinados, sino que también debe tenerse en cuenta la uniformidad de la vendimia en una parcela. Las parcelas presentan una variabilidad espacial natural, donde factores del medio físico (orografía del terreno o propiedades del suelo) y prácticas culturales (poda, riego o aplicación de fertilizantes) condicionan de manera importante la respuesta diferencial del cultivo, comportándose de manera diferente en sus distintas zonas, obteniendo así uvas con distintos parámetros cualitativos a pesar de estar tratada de forma unitaria. Por todo ello, adoptar una estrategia de riego eficiente no resulta nada sencillo. Conocer las características de las distintas zonas de una parcela, diferenciarlas y trabajar de forma individualizada para cada una de ellas, aportando las cantidades de agua adecuadas en función de las necesidades hídricas de la vid en cada zona, nos permitirá realizar un manejo y gestión vitivinícola más controlada y eficiente.

El riego es una herramienta de manejo del cultivo que nos puede ayudar a solventar problemas de uniformidad productiva y cualitativa de la uva. La programación del riego se realiza en base a las necesidades hídricas del cultivo, utilizando el método del balance hídrico y calculando la evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir del modelo de Penman-Monteith (Allen y otr. 1998) y el coeficiente de cultivo (K_c) en función del cultivo y estado fenológico. No obstante, cuando se realiza un riego deficitario, imponer un riego basado en el concepto de balance hídrico implica definir el estrés hídrico de la planta sobre la base de fracciones de ET. Esto puede producir cierto nivel de incertidumbre ya que el desarrollo del estrés hídrico no solamente depende del porcentaje de déficit de riego, sino también de la capacidad de retención de agua del suelo, del clima, material vegetal y condiciones de crecimiento (Reynold y Naylor, 1994; Bellvert y otr.

2009). Por lo tanto, es importante desarrollar una estrategia de riego deficitario que tenga en cuenta directamente el estado hídrico de la planta y que pueda ser aplicada y repetida satisfactoriamente. Una alternativa al usar fracciones de los requerimientos hídricos es utilizar directamente indicadores de estrés hídrico de la planta. Un buen indicador para estimar el estado hídrico de una planta es el potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}), el cual está íntimamente relacionado con las respuestas de la planta al estrés a corto y medio plazo y puede ser útil a la hora de realizar programaciones de riego (Girona y otr. 2006). Existe un gran número de estudios que han relacionado las respuestas productivas (Williams y Arujo, 2002; Grimes y Williams, 1990; Ojeda y otr. 2002) y cualitativas (Girona y otr. 2009; Ginestar y otr. 1998; Intrigliolo, 2009) de la vid con su estado hídrico. No obstante, la complejidad que comporta medir el ψ_{foliar} a gran escala en un espacio de tiempo limitado al mediodía, hace que sea un sistema inviable a nivel comercial y solamente pueda utilizarse experimentalmente.

En este sentido, las nuevas herramientas basadas en la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) tienen un papel importante. Numerosos estudios han relacionado los rendimientos con índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes aéreas multiespectrales (Arnó y otr. 2005; Martínez-Casasnovas y otr. 2009) y estado hídrico del cultivo (Acevedo-Opazo y otr. 2008; Kriston-Vizi y otr. 2008). No obstante, según nuestra experiencia, estos índices solamente determinan el vigor vegetativo del cultivo a partir de la reflectancia de las hojas. Además se consideran altamente estables para detectar variaciones de estrés hídrico en el tiempo y a prácticas culturales que pueden modificar la reflectancia. Solamente pueden considerarse indicadores del histórico de estrés hídrico acumulado en una parcela en un período de tiempo.

La temperatura de la hoja (T_h) ha sido ampliamente reconocida como indicador del estado hídrico de los cultivos (Jackson y otr. 1977; Gates, 1964), obteniendo un índice normalizado capaz de enmascarar el efecto de parámetros ambientales que afectan la relación entre el estrés y la temperatura de la planta. Este índice denominado Crop Water Stress Index (CWSI) (Idso y otr. 1981; Jackson y otr. 1981) consiste en relacionar la diferencia de temperaturas entre el dosel vegetativo y el aire (T_c y T_a , respectivamente) con la diferencia $T_c - T_a$ para una línea base sin estrés (NWSB) o *lower limit* (LL) y $T_c - T_a$ para un *upper limit* (UL), los dos siendo función del déficit de presión de vapor atmosférico (DPV) (Idso y otr. 1981). El CWSI nos proporciona un valor de 0 a 1 dependiendo del nivel de estrés hídrico del cultivo.

Tanto los índices de vigor vegetativo elaborados mediante imágenes multiespectrales como los índices indicadores del estado hídrico, obtenidos a partir de imágenes térmicas, pueden obtenerse a distintos niveles de resolución. No obstante, para el uso de estos indicadores en el manejo de los cultivos es necesario disponer de imágenes de elevada resolución espacial. Las imágenes de las que disponen los satélites actuales presentan una baja resolución espacial y espectral. Sobretudo para imágenes térmicas, las cuales se limitan a resoluciones medias, alrededor de unos 90 m de tamaño de pixel, lo que las hace impracticables para utilizarlas en distintos cultivos leñosos. En los últimos años, se han desarrollado algunas alternativas basadas en la instalación de sensores en vehículos aéreos tripulados y no tripulados para obtener imágenes de una mayor resolución tanto espacial como espectral.

Existen algunos ejemplos de estudios relacionados con la detección del estrés hídrico de los cultivos a partir del contenido de clorofila (Zarco-Tejada, P. y otr. 2009), detección de nutrientes en viñedo a partir de imágenes hiperespectrales (Gil-Pérez, B. y otr. 2010) o medida de parámetros estructurales como el índice de área foliar (LAI) (Haboudane, J. y otr. 2004). En este sentido, el laboratorio de investigación Quantalab, IAS-CSIC de Córdoba tiene una larga trayectoria en la obtención de imágenes multiespectrales y térmicas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Berni y otr. (2009) aplicaron un modelo basado en la temperatura del cultivo, estimada mediante imágenes térmicas de alta resolución espacial para calcular la conductancia estomática (g_s) y el *Crop Water Stress Index* (CWSI) de una plantación de olivo. El modelo físico utilizado para calcular el CWSI se basa en balances energéticos que tienen en cuenta parámetros conocidos que afectan las diferencias de temperatura entre el aire y la vegetación, como el déficit de presión de vapor (DPV), radiación neta (R_n), resistencia aerodinámica (r_a) y velocidad del viento (Hippis y otr. 1985; Jackson y otr. 1988). El CWSI se correlacionó con el ψ_{foliar} medido en distintos olivos en el momento del vuelo ($r^2=0.82$).

No obstante, hasta el momento nadie ha utilizado este índice como indicador del estado hídrico en viñedos con el propósito de utilizarlo como herramienta para adoptar estrategias de riego a gran escala.

OBJETIVOS

El presente estudio es parte de una tesis doctoral en ejecución y tiene como objetivo responder a si las imágenes térmicas obtenidas mediante vehículos aéreos pueden predecir el potencial hídrico foliar y ser utilizadas como indicadores del estado hídrico del cultivo y así poder adoptar estrategias de riego a nivel parcelario. Con el propósito de llevar a término ese objetivo, nos planteamos determinar el grado de correlación existente entre el ψ_{foliar} y las imágenes térmicas obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) en una parcela de viñedo en Raïmat (Lleida). Se obtuvo el grado de correlación en dos vuelos (9:00 y 12:00 GMT), con el propósito de averiguar el mejor momento para determinar el estado hídrico de la vid.

MATERIALES Y MÉTODOS

La parcela de estudio está situada en Raïmat (Lleida), con coordenadas 41°30'58''N, 0°30'10''E y 285 m de altura. Es un viñedo (*Vitis vinifera L.*) comercial de 12 hectáreas de 'Pinot-noir' regada por goteo y con un marco de plantación de 3.1x1.7 m con las filas orientadas al Norte.

El 31 de julio de 2009, se tomaron dos imágenes térmicas a las 9:00 y 12:00 GMT, utilizando un vehículo aéreo no tripulado equipado con un sensor térmico Miricle 307 KS (Thermoteknix Systems, UT) de una resolución de 640x480 pixel. La toma de imágenes térmicas y el posterior proceso de corrección atmosférica y geométrica fueron llevados a cabo por el equipo del Quantalab, IAS_CSIC Córdoba siguiendo la metodología de Berni *y otr.* (2009). La altura de vuelo fue de 150 m sobre el suelo, proporcionando imágenes de 40 cm de resolución espacial, permitiendo así, separar los píxeles de temperatura del suelo y de la vegetación.

Coincidiendo con la hora de los vuelos, se midió el potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}) en un total de 184 vides distribuidas homogéneamente en la parcela y geo-referenciadas. El ψ_{foliar} se midió mediante una cámara de presión (Scholander *y otr.* 1965) (Soil Moisture Equipment 3005 Corp. Santa Barbara, CA) siguiendo las recomendaciones de Turner y Long (1980). Con el objetivo de medir el ψ_{foliar} en un intervalo de tiempo limitado a 1:15 horas, se necesitaron dos equipos de trabajo con dos cámaras de presión.

Para determinar el grado de correlación entre la temperatura del dosel y el ψ_{foliar} en las dos imágenes obtenidas, se obtuvo el valor de temperatura promedio de los píxeles en aquellas vides donde se había medido el ψ_{foliar} . El análisis se realizó mediante el software de procesamiento y análisis de imágenes Envi 4.3 (ITT Visual Information Solutions), el cual permitió separar por umbrales de temperatura los píxeles correspondientes al suelo a los de vegetación.

El cálculo del Crop Water Stress Index (CWSI) se realizó a partir de la siguiente ecuación:

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

donde $(T_c - T_a)$ es la diferencia de temperatura medida de la hoja - aire, $(T_c - T_a)_{LL}$ el esperado *lower limit* de $(T_c - T_a)$ en el caso de un dosel potencialmente transpirando, y $(T_c - T_a)_{UL}$ el esperado diferencial en el caso de un dosel sin transpirar. Los *lower limit* y *upper limit* de la Eq.1 pueden obtenerse siguiendo la metodología propuesta por Idso *y otr.* (1981):

Se determinó que bajo unas condiciones adecuadas de agua en el suelo (idealmente máxima conductancia estomática), $T_c - T_a$ es una función lineal de DPV (*non-water-stressed baseline*, NWSB). El *upper limit* es una constante. Se obtiene a partir de la NWSB suponiendo la existencia de una atmósfera sobresaturada de

agua, con DPV negativos. Cabe decir entonces que este método es dependiente de las condiciones climáticas del lugar.

Para llevar a término el cálculo de las dos líneas base, durante dos años consecutivos (2009 y 2010) se instalaron dos sensores de temperatura infrarrojo (PC151HT-4; Pyrocouple, *Calex electronics*) encima de dos vides con distintos tratamientos de riego, uno de estrés severo (Déficit) y otro según las necesidades hídricas de la vid (Control), con el propósito de obtener continuamente la temperatura de la hoja. Para la instalación de estos sensores, se siguieron los consejos utilizados por Testi *y otr.* (2008). Todos los sensores se conectaron a un datalogger (model CR200X, Campbell Scientific, Logan, UT) que almacenó la temperatura en intervalos de 5 minutos. La temperatura de la hoja se midió desde el 15 de junio hasta el 15 de agosto para cada uno de los años estudiados. Se calculó el *CWSI* continuamente a partir de la Eq. 1 y obteniendo la T_a y DPV de una estación meteorológica instalada en la parcela. Semanalmente se realizaron 1-2 medidas del potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}) en las vides donde se instalaron los sensores, que posteriormente sirvieron para validar la metodología.

Finalmente, mediante el programa ArcMap (ArcGIS 9.3, ESRI) y a partir de la ecuación del *CWSI* obtenida para cada vuelo, se obtuvo un mapa normalizado del *CWSI* en la parcela, donde se diferenciaron aquellas zonas más estresadas, con valores de *CWSI* próximos a 1, de las bien regadas, con valores próximos a 0.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Figura 1 muestra el mosaico térmico del viñedo, obtenido a partir de un conjunto de imágenes térmicas realizadas en el vuelo de las 12:00 GMT el 31-julio 2009. En el detalle se observa la alta resolución de la imagen, capaz de separar los píxeles pertenecientes a la vegetación de los del suelo.

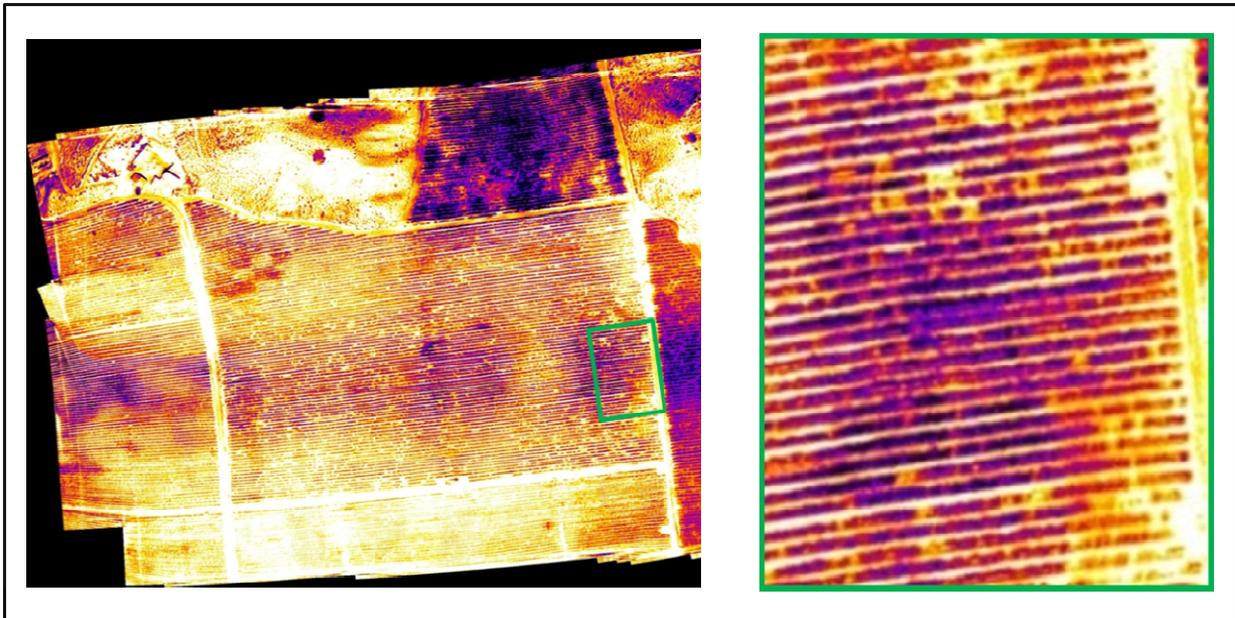


Fig.1. Mosaico y detalle obtenido a partir de imágenes térmicas adquirida con el UAV a las 12:00 GMT en un viñedo de 11 hectáreas en Raïmat (Lleida).

El estado hídrico de la parcela, obtenido midiendo el ψ_{foliar} en 184 vides del viñedo, presentó una elevada variabilidad en las dos horas en que se realizó la medida. En la Figura 2 se presentan dos mapas mostrando la distribución de la variabilidad espacial hídrica dentro de la parcela. A las 9:00 GMT se obtuvo un coeficiente de variación (C_V) del 23.67 %, con un ψ_{foliar} máximo de -0.5 MPa y mínimo de -1.6 MPa. En la medida de las 12:00 GMT el C_V fue del 20.97%, con valores máximos de -0.6 MPa y mínimos de -1.7 MPa. Se observó un aumento del estrés hídrico de las vides a medida que avanzó el día, sobre todo en aquellas zonas que presentaban ψ_{foliar} intermedios a las 9:00 GMT.

La relación entre el ψ_{foliar} y la diferencia de temperatura del dosel y el aire (T_c-T_a) se comportó de manera distinta en las dos horas de medida. Así, a las 9:00 GMT y 12:00 GMT se obtuvo una $R^2=0.456$ y $R^2=0.714$, respectivamente. Esta diferencia se debe a dos posibles causas: para medir el ψ_{foliar} en las 184 vides de la parcela es necesario un tiempo aproximado de 1:15 horas. Se conoce en la evolución diurna del ψ_{foliar} en la vid, que éste disminuye progresivamente durante la mañana hasta llegar a los máximos valores negativos al mediodía y estabilizándose entonces durante unas horas (van Zyl, 1987, Choné y otr. 2001). La medida de las 9:00 GMT se realizó en el momento en que el ψ_{foliar} no permaneció estable, pudiendo encontrar una gran variabilidad del estado hídrico de la vid para una misma temperatura del dosel. No obstante, a las 12:00 GMT, los valores del ψ_{foliar} fueron más estables, diferenciando aquellas vides sometidas a un estrés severo de aquellas bien regadas. Además, también influyó el efecto de la sombra en el vuelo de las 9:00 GMT, en el cual existió la presencia de más píxeles correspondientes a hojas sombreadas, los cuales son prácticamente imposibles de eliminar. En las imágenes térmicas se observa la parte superior del dosel, donde están las hojas más expuestas a la radiación solar al mediodía, pero durante las otras horas del día parte de las hojas que se detectan en las imágenes están sombreadas, presentando así píxeles con una temperatura más baja.

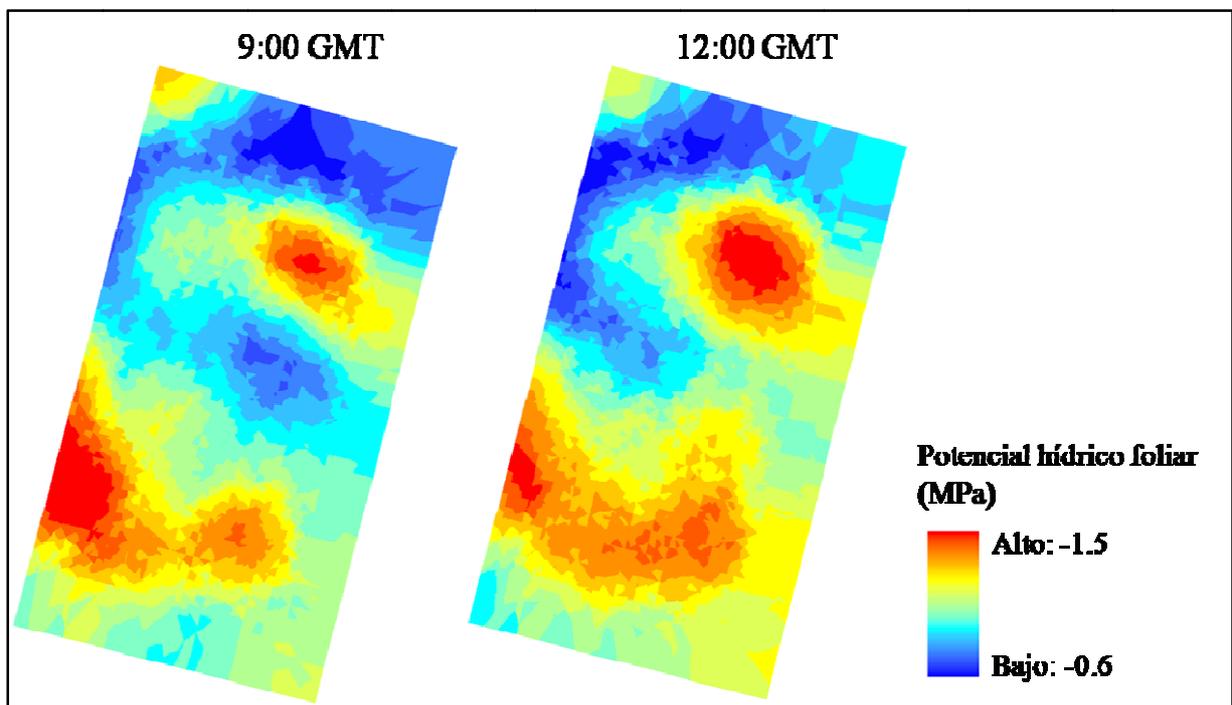


Fig.2. Mapas del estado hídrico de la parcela, determinados midiendo el potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}) a) a las 9:00 GMT (b) a las 12:00 GMT

Sensores de temperatura infrarrojo

La temperatura infrarrojo del dosel vegetativo (T_c) mostró claras diferencias entre las vides estresadas (Déficit) y las bien regadas (Control). No hubo diferencias significativas entre tratamientos de la temperatura del dosel a primeras horas de la mañana y al atardecer. Al mediodía las diferencias máximas entre tratamientos llegaron a 7 °C entre las 12:00 y 15:00 GMT (Fig. 3a). Los resultados obtenidos para T_c-T_a para cada vid medida se muestran en la Fig. 3b, llegando a T_c-T_a máxima de 10 °C para la vid en Déficit y 2 °C en el Control. Se muestra además valores de T_c-T_a negativos en el tratamiento Control, a primeras horas de la mañana y por la tarde, debido al efecto de refrigeración que provoca la transpiración.

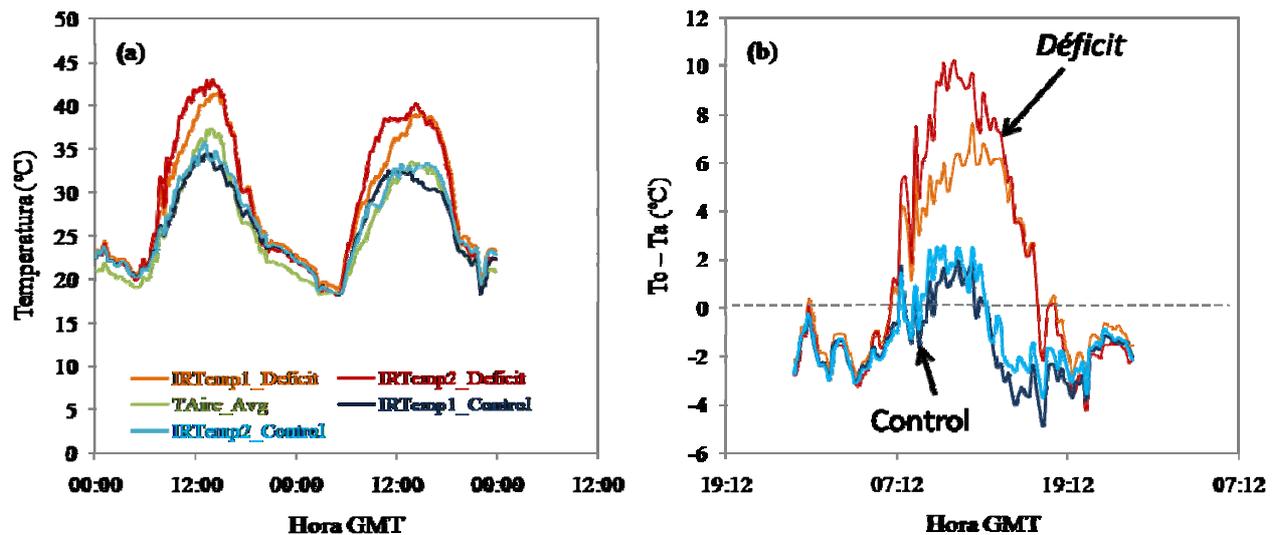


Fig.3. (a) Temperatura infrarrojo diaria del dosel vegetativo obtenida por tratamientos el 9 y 10 de julio de 2010. (b) Datos de Temperatura diaria infrarrojo $T_c - T_a$ (temperatura dosel vegetativo menos temperatura del aire) obtenida por tratamientos el 9 de julio de 2010: rojo y naranja (tratamientos en déficit), azules (tratamientos control).

Crop water stress index

Se realizó una selección de los datos de temperatura infrarrojo obtenidos en la vid Control en los años 2009 y 2010, utilizando solamente aquellos días con cielo claro. Se analizó la correlación entre $(T_c - T_a)$ y el DPV en intervalos horarios, desde las 9:00 hasta las 17:00 GMT, no obstante a primeras horas de la mañana, esta correlación no resultó significativa, debido a una menor transpiración y mayor sombreado de las hojas. La pendiente de las líneas base pareció ser bastante estable en el intervalo de tiempo de 10:00 – 16:00 GMT, aumentando el DPV y disminuyendo $(T_c - T_a)$ a medida que avanzaron las horas. La intercepción incrementó por la mañana y disminuyó por la tarde. Testi *y otr.* (2008) demostró este comportamiento, mostrando que la intercepción es función de la radiación neta (R_n) y de la resistencia aerodinámica a la transferencia de vapor de agua (r_a), suponiendo un aumento a medida que la radiación solar aumenta y la velocidad del viento disminuye. Se determinó una línea base para el tratamiento Control o *Non-water stressed baseline*, con los datos promedio de los dos años analizados. El *upper limit* se determinó siguiendo el modelo de Idso *y otr.* (1981).

La evolución del CWSI a las 12:00 GMT en los dos tratamientos de riego (Control y Déficit) durante el período 1 julio al 20 agosto se muestra en la *Figura 4a*. Se observa claramente la vid más estresada, presentando valores por encima de 0.8 durante todo el período, lo que demuestra la intensidad de estrés a la que están sometidas estas vides. El Control, en todo momento bien regado, muestra valores de CWSI por debajo de 0.3 durante todo el período. Tal y como ya observó Testi *y otr.* (2008), el CWSI mostró ser un indicador de estrés hídrico muy adecuado y sensible debido a la rapidez en que se detecta la respuesta después de cada riego y los valores absolutos a los que se puede llegar en máximos estreses.

El potencial hídrico foliar es el indicador de estrés comúnmente más utilizado. Con el propósito de validar la metodología se determinó la relación entre el ψ_{foliar} y el CWSI en aquellas vides donde se habían obtenido periódicamente datos de temperatura en los años 2009 y 2010. Así, se obtuvo una $R^2 = 0.82$, obteniendo los máximos valores del CWSI correspondiendo con ψ_{foliar} alrededor de -1.6 MPa, lo que demostró la viabilidad del uso del CWSI como indicador del estrés hídrico en la vid (*Figura 4b*).

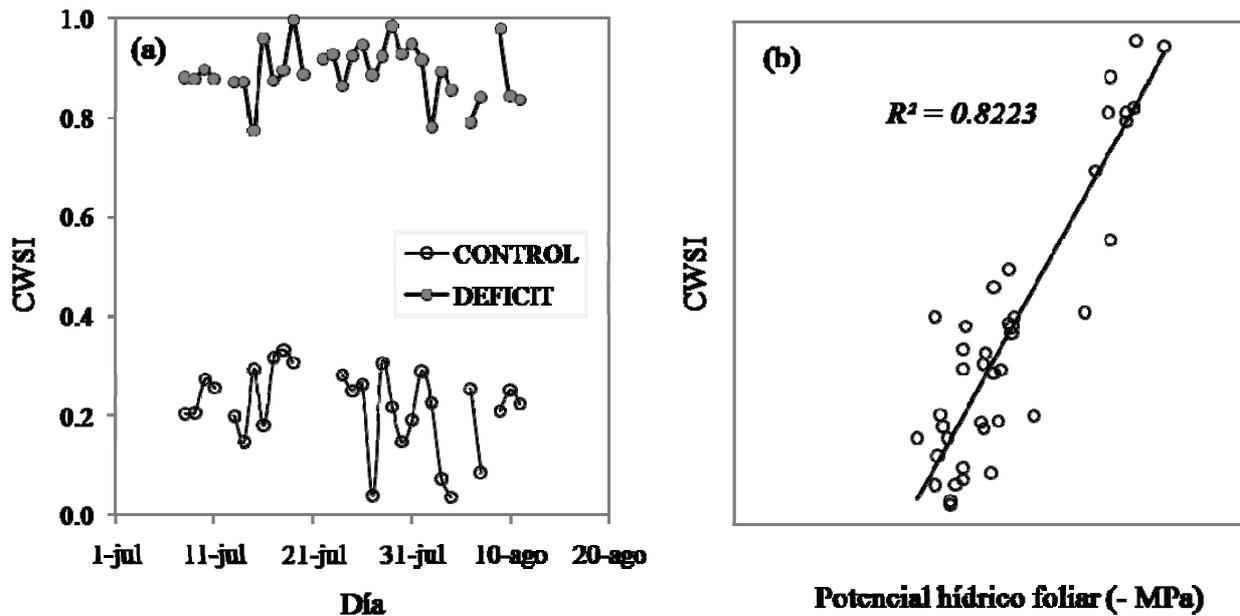


Fig.4. a) Evolución estacional del CWSI en los tratamientos Control (círculos vacíos) y Déficit (círculos rellenos) desde el 1-julio al 20-agosto, obtenidos a partir de la medida de la temperatura del aire y del dosel vegetativo a las 12:00 GMT. b) Relación entre el CWSI y el potencial hídrico foliar (ψ_{foliar}) a las 12:00 GMT, medido en los tratamientos Control y Déficit

Finalmente, se determinó la relación entre el ψ_{foliar} y el CWSI en todos los puntos medidos en la parcela, en las dos horas estudiadas. A las 12:00 GMT, se encontró una buena correlación ($R^2=0.71$), con los valores máximos de CWSI correspondientes a potenciales del orden de -1.6 MPa, y viceversa, las vides que presentaron potenciales superiores a -1.2 MPa (considerado el umbral a partir del cual la vid presenta estrés moderado, (Girona y otr. 2006)), se corresponden con valores de CWSI por debajo de 0.4. Por otro lado, la relación a las 9:00 GMT, no se ajustó a los valores determinados por el CWSI (entre 0 y 1) sino que existió un desplazamiento del CWSI hacia valores negativos. Este fenómeno se debe a lo comentado anteriormente, dónde la presencia de píxeles que contienen hojas sombreadas disminuye ligeramente la temperatura del dosel, presentando valores de $(T_c - T_a)$ negativos. Además, la *Non-water stressed baseline* se determinó durante el período de las 10:00 – 16:00 GMT, ya que anteriormente no se encontró una buena respuesta del DPV a la diferencia de temperatura del dosel y aire $(T_c - T_a)$.

La Figura 5 muestra el mapa normalizado del CWSI a las 12:00 GMT, obtenido a partir de la Eq.1, siendo $T_a = 32.27\text{ }^\circ\text{C}$ y $\text{DPV} = 2.37\text{ KPa}$. Pueden diferenciarse claramente aquellas zonas en que las vides están sometidas a un mayor déficit hídrico (rojo) de aquellas mejor regadas (azul). A partir de estos mapas, el manejo del riego puede ser más eficiente, aplicando la estrategia de riego adecuada solamente en aquellas zonas de la parcela que lo requieran. Además, también ha resultado ser una herramienta adecuada para la detección de escapes en el riego.

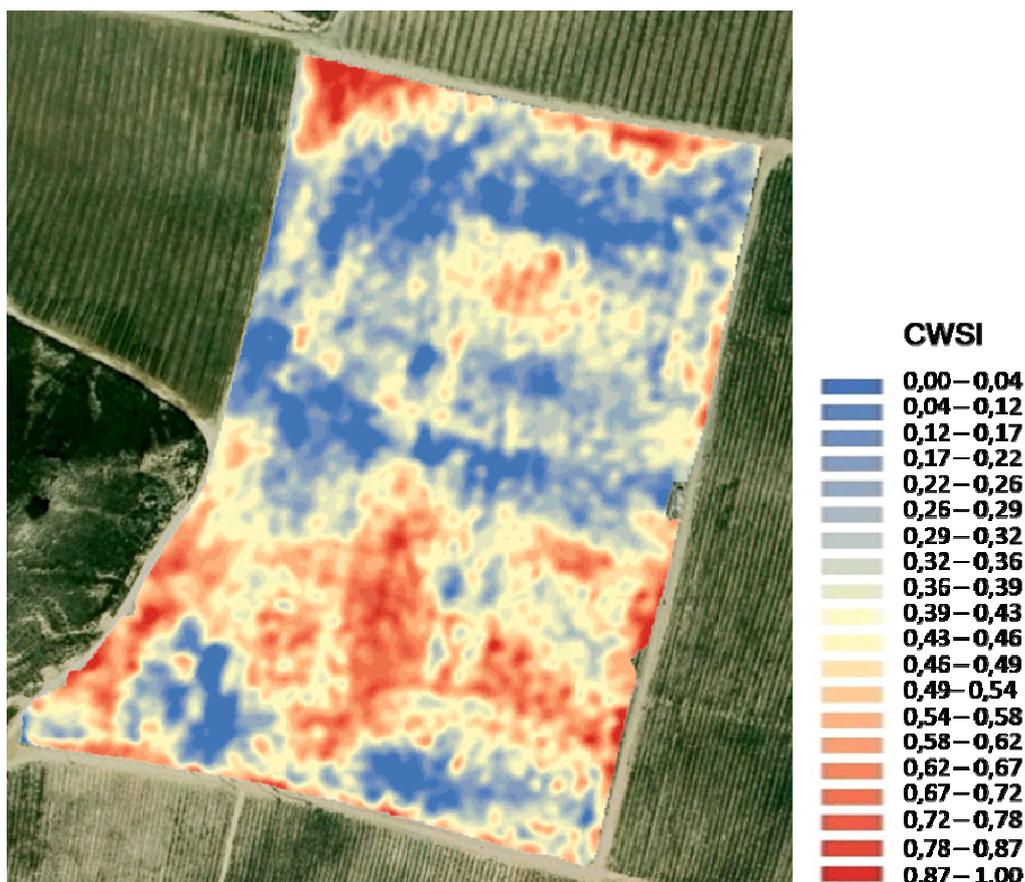


Fig.5. Mapa normalizado del *Crop Water Stress Index* (CWSI) en un viñedo de 11 hectáreas en Raïmat (Lleida) a las 12:00 GMT

CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha demostrado la viabilidad de una metodología para la detección del estrés hídrico en viñedos a partir de la obtención de imágenes térmicas. El desarrollo de esta herramienta permitirá implementarla en la gestión eficiente del riego a nivel parcelario. La alta resolución espacial ha resultado indispensable a la hora de diferenciar la temperatura del dosel y la del suelo, pudiendo así obtener un índice de estrés normalizado ajustado a la temperatura del dosel. En este estudio se ha determinado que el momento idóneo para la obtención de las imágenes térmicas y posteriormente la obtención del índice CWSI es durante el intervalo de tiempo de 10:00 – 16:00 GMT, ya que la respuesta del DPV y el efecto de sombreado a primeras horas de la mañana, ha resultado ser un factor limitante.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda financiera al SUDOE para el proyecto europeo Telerieg *SOE1/P2/E082* y al MICINN para el proyecto Rideco-Consolider *CSD2006-00067*. La oportunidad de realizar este proyecto bajo el marco de colaboración en investigación de la ‘Unidad Mixta CODORNIU-IRTA’. El apoyo técnico y práctico en la captura y procesamiento de las imágenes térmicas al equipo del Quantalab, IAS-CSIC de Córdoba. Los autores querían agradecer especialmente a José Antonio Jiménez Berni, Jaume Casadesús, Jordi Marsal y Victoria González por su especial interés y soporte técnico en los análisis de datos y a Jesús del Campo, Mercè Mata, Carles Paris, Núria Bonastre, Xavier Vallverdú y Germán Estudillos por su importante ayuda técnica con las medidas en campo. Especial agradecimiento a las bodegas Raïmat y particularmente a Joan Esteve i Xavier Ferré por su soporte, comentarios valiosos y sugerencias en el experimento.

REFERENCIAS

- Acevedo-Opazo, C. Tisseyre, B. Guillaume, S. Ojeda, H. (2008): The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precision Agriculture* 9, 285-302
- Allen, RW. Pereira, LS. Raes, D. Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. 300 pp
- Arnó, J. Martínez-Casasnovas, J. A. Blanco, R. Bordes, X. y Esteve, J. (2005): Viticultura de precisión en Raïmat (Lleida): experiencias durante el periodo 2002-2004. *ACE, Revista de ENOLOGIA*, 64
- Bellvert, J. Mata, M. Arbonés, A. del Campo, J. Marsal, J. Girona, J. (2009): Programación de riego deficitario. *Vinoteq Enero-Marzo*, 26-30
- Berni, J.J. Zarco-Tejada, J.P. Sepulcre - Cantó, G. Fereres, E. Villalobos, F. (2009): Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. 113, 2380-2388
- Choné, X. van Leeuwen, C. Dubourdieu, D. Gaudillères, J.P. (2001): Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, 87: 477-483
- Esteban, M.A. Villanueva, M.J. and Lissarrague, J.R. (1999): Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation: Sugars, organic acids, and mineral elements. *American Journal of Enology and Viticulture* 50, 257-268
- Gates, D. (1964): Leaf temperature and transpiration. *Agron J* 56, 273-277
- Gil-Pérez, B. Zarco-Tejada, P.J. Correa-Guimaraes, A. Relea-Cangas, E. Navas-Gracia, L.M. Hernández-Navarro, S. Sanz-Requena, J.F. Berjón, A. Martín-Gil, J. (2010): Remote Sensing Detection of Nutrient Uptake in Vineyards using narrow-band hyperspectral imagery. *Vitis*, 49 (4), 167-173
- Ginestar, C. Eastham, J. Gray, S. and Iland, P. (1998): Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* 49, 421-428.
- Girona, J. Mata, M. del Campo, J. Arbonés, A. Bartra, E. Marsal, J. (2006): The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science* 24, 115-127
- Girona, J. Marsal, J. Mata, M. del Campo, J. and Basile, B (2009): Phenological sensitivity of berry growth and quality of “Tempranillo” grapevines (*Vitis vinifera L.*) to water stress. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15, 268-277
- Grimes, D.W. and Williams, L.E. (1990): Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson seedless grapevines. *Crop Sci.* 30: 255-260
- Haboudane, D. Miller, J. Pattey, E. Zarco-Tejada, P. and Strachan, I. (1977): Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green leaf area of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, Vol 90, no.3, pp.337-352
- Hipps, L. Asrar, G. and Kanemasu, E. (1985): A theoretically-based normalization of environmental effects on foliage temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 35, 113-122
- Idso, S.B. (1982): Non-water-stressed baselines – a key to measuring and interpreting plant water-stress. *Agric Meteorol*, 27, 59-70

- Intrigliolo, D. Castel, JR. (2009): Response of grapevine cv. 'Tempranillo' to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition. Irrigation Science DOI 10.1007/s00271-009-0164-1
- Jackson, R.D. Reginato, R.J. Idso, S.B. (1977): Wheat canopy temperature – practical tool for evaluating water requirements. Water Resour Res 13, 651-656
- Jackson, R.D. Idso, S.B. Reginato, R.J. Printer, P.J. (1988): Canopy temperature as a crop water-stress indicator. Water Resour Res 17, 1133-1138
- Kriston-Vizi, J. Umeda, M. Miyamoto, K. (2008): Assessment of the water status of mandarin and peach canopies using visible multispectral imagery. Biosystems engineering 100, 338-345
- Martínez-Casasnovas, J. A. Agelet, J. Arnó, J. Bordes, X. (2009): Protocolo para la zonificación intraparcular de la viña para vendimia selectiva a partir de imágenes multiespectrales. TELEDETECCIÓN, Agua y desarrollo sostenible, XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 45
- Ojeda, H. Andary, C. Creaba, E. Carbonneau, A. and Doloire, A. (2002): Influence of pre- and post-veraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. American Journal of Enology and Viticulture. Vol 53; p. 261-267
- Reynolds, AG. Naylor, AP. (1994): "Pinot noir" and "Riesling" grapevines respond to water stress duration and soil water-holding capacity. Hort Sci 29 (12):1505-1510
- Scholander, P.F. Hammel H.T. Bradstreet, E.D. Hemmingsen, E.A. (1965): Sap pressure in vascular plants. Science 148, 339-346
- Schultz, H.R. Gruber, B.R. (2005): Bewässerung und 'Terroir'. Ergänzung oder Gegensatz? Das Deutsche Weinmagazin 1, 24-28
- Testi, L. Goldhamer, D.A, Iniesta, F. Salinas, M. (2008): Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. Irrig Sci. 26, 295-405
- Turner, N.N. Long, M.J. (1980) Errors arising from rapid water loss in the measurement of leaf water potential by pressure chamber technique. Austr J Plant Physiol 7, 527-537
- Van Leeuwen, C. Seguin, G. (1994): Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). Journal International Sciences de la Vigne et du Vin 28, 81-110
- Van Zyl, J.L. (1987): Diurnal variation in Grapevine Water Stress as a function of changing soil status and meteorological conditions. S. Afr.J.Enol.Vitic., Vol.8, n°2
- Williams, L.E. and Arujo, F.J. (2002): Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 127:448-454
- Zarco-Tejada, P.J. Berni, J.A. Suárez, L. Sepulcre-Cantó, G. Morales, F. Miller, J.R. (2009): Imaging Chlorophyll Fluorescence from an Airborne Narrow-Band Multispectral Camera for Vegetation Stress Detection. Remote Sens. Environ. 113, 1262-1275