



AGENCIA NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN

Informe final publicable de proyecto

La teledetección como herramienta para un uso eficiente del riego en cultivos y pasturas

Código de proyecto ANII: FSA_1_2018_1_152903

Fecha de cierre de proyecto: 01/06/2024

GARCÍA GALLÁRRETA, Claudio (Responsable Técnico - Científico)

RAMOS, Julián Andrés (Investigador)

RUBIO DELLEPIANE, Valentina (Investigador)

TISCORNIA TOSAR, Guadalupe (Investigador)

CAL ALVAREZ, Adrián (Investigador)

OTERO, Alvaro (Investigador)

QUINCKE WALDEN, Juan Andrés (Investigador)

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. INIA LAS BRUJAS (Institución Proponente) \\
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIÓN LITORAL NORTE \\
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA

Resumen del proyecto

El uso de indicadores del estado de humedad del suelo, así como del estado hídrico de los cultivos para la optimización del riego han sido estudiado por varios autores (Girona et al. 2006; Girona et al. 2009; Bausch et al., 2011). El uso de la teledetección permite mejorar el uso del balance hídrico gracias a la mejora de las estimaciones de la evapotranspiración real de los cultivos bajo riego y a la posibilidad de extender el análisis a áreas mayores (Johnson y Trout, 2012; Gonzalez Dugo et al., 2010). Los sensores hiperspectrales remotos de alta resolución en conjunto con modelos de balance térmico de la superficie permiten medir el estado hídrico de los cultivos en grandes extensiones. El objetivo de la presente propuesta fue mejorar el uso del agua en los sistemas agrícolas a partir de nuevas herramientas; a) mediante la medición de la evapotranspiración del cultivo en su dimensión espacial, con la utilización de la teledetección de media y alta resolución, en conjunto con el modelo METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration); b) el desarrollo de métodos geofísicos (georadar y tomografía de resistividad eléctrica) para medir la compactación y el agua del suelo en su dimensión espacial; y c) el desarrollo de métodos remotos de temperatura de cultivos y pasturas, Crop Water Stress Index (CWSI), asociados a la tolerancia al estrés hídrico.

Ciencias Agrícolas / Agricultura, Silvicultura y Pesca / Agricultura / teledetección, riego, geomática

Palabras clave: sensoramiento remoto / estrés hídrico / manejo del riego /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

La agricultura es el principal motor de crecimiento en la mayoría de las economías en vías de desarrollo, y a la vez el sector que más agua consume. Se estima, según la FAO (2013), que la superficie mundial bajo riego es de 220 millones de hectáreas y que el riego consume un 69% de los recursos hídricos (agua dulce), llegando incluso al 90% en algunas regiones. A medida que la población aumenta (aproximadamente 75 millones cada año), los recursos per cápita disponibles son más restringidos, por lo que se hace necesario incrementar la productividad de manera sostenible, preservando los recursos naturales y el medio ambiente. Bajo estas circunstancias, realizar un manejo del agua de riego eficiente puede traducirse en ahorros importantes del recurso. A la vez, la adopción de estrategias de riego adecuadas permite mejorar la eficiencia productiva (kg alimento/m³ de agua). Para realizar un riego eficiente en cualquier cultivo es necesario saber cuánto y cuándo regar (Tarjuelo 2005, Fereres y Soriano, 2007). Por lo tanto, la elección de la estrategia de riego debe tener en cuenta la especie vegetal, la intensidad del déficit hídrico y el momento fenológico en que se aplica, entre otros manejos. La técnica más extendida para realizar un adecuado manejo del agua en la agricultura bajo riego es la programación de riego, la cual identifica el momento y la cantidad de agua que se ha de aportar al cultivo en cada riego y cuyo manejo se puede realizar en base a diferentes criterios agronómicos (maximizar la producción total de la explotación agrícola, lograr el máximo beneficio económico, etc.) (Otero, et al., 2017). La programación del riego se realiza en base a las necesidades hídricas, utilizando por lo general el método del balance hídrico, que comprende en su versión más simple: la precipitación efectiva, el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir del modelo de Penman-Monteith (Allen et al. 1998) y el coeficiente de cultivo simple (K_c) o doble (K_{cb}+K_e) en función del tipo de cultivo y del estado fenológico y las características del suelo. No obstante, aplicar un riego basado en el concepto de balance hídrico implica definir el agotamiento del agua en el suelo permitido sobre la base de fracciones de ET_o. Este método puede producir cierto nivel de incertidumbre, ya que el desarrollo del estrés hídrico no solamente depende del porcentaje de déficit de

agua, sino también de la capacidad de retención de agua del suelo, del clima, cultivo y condiciones de crecimiento (Reynold y Naylor, 1994). La variabilidad espacial natural que tienen los cultivos y pasturas en nuestro país es grande, donde factores del medio físico (orografía o propiedades del suelo) y las prácticas culturales (densidad de plantas, riego, aplicación de fertilizantes) condicionan de manera importante la respuesta del cultivo, implica unas necesidades hídricas diferentes en las distintas subáreas o ambientes. En consecuencia, a la hora de programar el riego, y tomar decisiones que permitan aumentar la eficiencia de uso del agua, es preciso hacer un manejo diferencial en función de la variabilidad encontrada en los predios y aportar distintas cantidades de agua en las distintas subáreas en función de sus requerimientos hídricos. Para ello, es necesario disponer de indicadores del estado hídrico de los cultivos, tales como el potencial hídrico de hoja (Ψ_L) o la temperatura de la hoja (T_c), que permitan detectar el estado hídrico de grandes extensiones y puedan ser utilizados como herramienta de programación del riego (Girona et al. 2006). Por otro lado, es necesario desarrollar indicadores de fácil acceso que permitan evaluar y discriminar la variación espacial física del suelo, directamente relacionados con la compactación del suelo, con la profundidad de sus horizontes y el contenido de agua del mismo. En este sentido, existe interés en el sector agropecuario en general, en mejorar el manejo del riego teniendo en cuenta su heterogeneidad de ambiente. Para ello, el uso de las nuevas tecnologías basadas en la teledetección, sistemas de información geográfica, y métodos geofísicos se presentan como herramientas de gran utilidad para gestionar más eficientemente el manejo del riego. Actualmente, la heterogeneidad productiva se resuelve utilizando aplicaciones basadas en la teledetección y en distintas escalas de sensoramiento remoto. Algunas aplicaciones se basan en realizar estudios del estado de los cultivos y/o pasturas clasificando las diferentes subáreas en función de su índice de vegetación, tales como el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), o el Plant Cell Density (PCD) (Bramley et al. 2003). Sin embargo, la teledetección también puede utilizarse como una herramienta de gestión del riego. Para realizar un manejo del riego eficiente es necesario, en primer lugar, disponer de un diseño de los sectores de riego acorde con la variabilidad espacial. La detección del estado hídrico de los cultivos a partir de la temperatura de la hoja (T_c), también forma parte de las actuales líneas de investigación y desarrollo de la teledetección. Con el desarrollo de esta tecnología, será posible detectar remotamente el estado hídrico de grandes extensiones, aportar distintas cantidades de agua en cada subárea en función de sus necesidades hídricas, y adoptar las estrategias de riego más convenientes con el consiguiente ahorro de agua y energía. La temperatura de la hoja o del dosel vegetativo (T_c) ha sido también ampliamente reconocida como indicador del estado hídrico de los cultivos (Jackson et al. 1977; Gates, 1964; Tanner 1963). Inicialmente, con el desarrollo de los primeros sensores de temperatura infrarrojo, se utilizó la diferencia de temperatura entre la existente a nivel de la cubierta vegetal y la del aire ($T_c - T_a$) (Jackson et al. 1977). El concepto se basa en que las plantas sometidas a un estrés hídrico tienden a cerrar los estomas para evitar una mayor pérdida de agua, lo que hace disminuir su transpiración, así como su capacidad de realizar la fotosíntesis. En consecuencia, $T_c - T_a$ aumenta a medida que las plantas presentan un mayor estrés hídrico. Sin embargo, la temperatura de la cubierta vegetativa también está afectada por otros factores ambientales, tales como la humedad relativa, el viento o la radiación y, por lo tanto, no puede por sí sola ser un buen indicador del estado hídrico de los cultivos. Por ese motivo, $T_c - T_a$ se ha normalizado teniendo en cuenta estos factores y se ha desarrollado un índice denominado Crop Water Stress Index (CWSI) (Idso et al. 1981). El uso de este indicador ha sido mayormente utilizado con medidas puntuales con termómetros o sensores de temperatura infrarrojo (Jones and Leinonen, 2003; Jones, 2004). Resultados preliminares de Gonçalves et al. (2017) muestran que las imágenes térmicas también pueden ser utilizados no solamente para aspectos del manejo del riego en cuanto a la aplicación del agua sino también a aspectos de la uniformidad y distribución del agua en el sistema de riego. La variabilidad espacial de diferentes características de un suelo, pueden ser estudiadas mediante métodos tradicionales, tales como muestreos, calicatas, penetrometría, entre otros. Sin embargo, la implementación de estos métodos para la obtención de datos se hace difícil debido al tiempo que lleva la

obtención de medidas representativas y precisas de un área. El caso la excavación de calicatas genera efectos nefastos sobre el suelo. El penetrómetro debe ser insertado en cada lugar en el que se desee obtener una medida por lo que, al utilizar esta metodología puntual, es imposible tener la cartografía continua sobre la superficie del suelo (Raper et al., 1990). Debido a estos problemas, ha surgido la necesidad de utilizar otros dispositivos no destructivos que permitan detectar, de manera indirecta, características del subsuelo. La Geofísica es una ciencia que estudia indirectamente la Tierra mediante métodos de la física. Utiliza diferentes métodos con los que pueden determinarse propiedades físicas de las rocas, como ser la densidad, resistividad, permitividad dieléctrica, susceptibilidad magnética, entre otras. Estas propiedades físicas pueden ser obtenidas en forma directa, a través de estudios petrofísicos realizados sobre muestras o testigos de perforación en laboratorios, o en forma indirecta desde la superficie. Delgado Rodríguez et al. (2012) entienden que el conocimiento de los parámetros petrofísicos del suelo es útil para la agricultura y el análisis de impacto ambiental. Medir las propiedades del suelo brindaría la posibilidad de identificar la variabilidad espacial de diferentes características edáficas, si estas se correlacionan con las alguna, o un grupo de las propiedades físicas antes mencionadas. de Vetten (2014), en su tesis de maestría, compara diferentes métodos para evaluar características estructurales de vertisoles negros, entre los cuales se encuentran, el anillo de muestreo, el penetrómetro, el método de inducción de dos bobinas con EM 38, el georradar, y la tomografía de resistividad eléctrica entre otros. Concluye que, el muestreo tradicional de anillos es una técnica lenta y poco fiable, que el penetrómetro proporciona resultados adecuados en el laboratorio en condiciones secas, pero debería ser probado en condiciones de campo, que el EM38 puede detectar la compactación del suelo en una gama más amplia de contenido de agua y proporciona mucho potencial para futuras investigaciones. Asimismo, menciona que la literatura sugiere que la tomografía de resistividad de eléctrica proporcionaría buenos resultados. Explica que cada método que se discutió tenía sus ventajas y desventajas, no encontrando uno superior a los demás. Lo hasta aquí expuesto pone en evidencia que a nivel internacional, existen herramientas y experiencias que pueden ser replicadas en el país que permitirían mejorar la eficiencia de un recurso muypreciado y vital, el agua.

Metodología/Diseño del estudio

La estrategia de investigación se basa en las fortalezas de las instituciones intervinientes particularmente en investigación en sensoramiento remoto, métodos geofísicos y tecnologías bajo riego. La presente propuesta constará de tres componentes que generarán la información necesaria para abordar la problemática planteada y que se organizarán en un total de cinco actividades. El primer componente tendrá como objetivo generar los procedimientos necesarios para estimar la evapotranspiración real de cultivos y pasturas en una doble escala espacial. Ambas escalas de estimación utilizan técnicas de balance de energía para estimar la evapotranspiración (ET), a través de dos procedimientos complementarios, 1) el SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) (Bastiaanssen, 1995, 2000; Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b) y 2) el METRIC™ (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration). Ambos procedimientos están basados en datos de imágenes satelitales calculando ET en forma residual del balance de energía de la superficie terrestre. Las dos escalas propuestas de trabajo están dimensionadas por el tipo de imágenes del satélite previsto de ser usado (Landsat 7 y 8), y a través de imágenes obtenidas por drones equipados por cámaras térmicas FLIR (USA) y cámaras multiespectrales (MCA, USA). Ambas metodologías son apoyadas por estaciones climáticas de medición horaria (Campbell, USA) y por torres Eddy Covariance (Licor, USA) cercanas a las zonas de evaluación. Cada torre tiene instrumentos para medir en paralelo el balance de energía (radiómetros, placas de flujo y sondas de temperatura del suelo) y la evapotranspiración directamente de la covarianza de Eddy (anemómetro sónico, IRGA). El segundo componente permitirá estudiar el agua en el suelo y su distribución espacial a partir del estudio de las

propiedades físicas tanto en áreas de pasturas como de cultivos, ambos bajo condiciones contrastantes en cuanto al contenido de agua en el suelo, compactación y diferenciación de horizontes del suelo. A tal efecto se prevé utilizar inicialmente dos métodos geofísicos complementarios para este estudio: a) Método del georradar (GPR)(Zond-12e Advanced, Radar Systems) y b) la tomografía de resistividad eléctrica (Resistímetro GD 10, Geomative); ya que la combinación de diferentes técnicas geofísicas permite eliminar ambigüedades a la hora de realizar la interpretación (Ramos, 2016). La técnica del GPR posibilita la penetración de tierra y fue creada en la década de 1970. Permite a los investigadores detectar irregularidades del suelo que serían imposibles de detectar si no se excava (Raper et al., 1990). El GPR es un sistema de radar de banda ancha específicamente diseñado para penetrar materiales de la tierra emitiendo un pulso electromagnético corto, en el rango de frecuencia de 10-2000 MHz, desde una antena colocada en la superficie (Doolittle, 1987). Por otro lado, la tomografía de resistividad eléctrica, es una técnica de prospección eléctrica que combina dos métodos geofísicos de corriente continua, el perfilaje eléctrico y el sondeo eléctrico vertical, para obtener imágenes en 2D de resistividad en el perfil medido. Consiste en un dispositivo multielectrónico conectado a un resistímetro a través de un conmutador el cual elige, de manera automática, el par de electrodos de inyección de corriente y el par de medición de diferencia de potencial. En función del arreglo electrodo implementado en forma automática, se determina la resistividad aparente para una profundidad determinada. El resultado que se obtiene, luego de procesados e invertidos los datos medidos es una imagen de resistividad en 2D. Se realizarán ensayos en diferentes sitios, seleccionados por el tipo de suelo y grado de compactación y con diferentes sistemas de riego. Se prevé evaluar estos métodos en experimentos de largo plazo de INIA, para asegurar a priori la existencia de condiciones contrastantes en cuanto a la calidad física del suelo y así evaluar su sensibilidad. Adicionalmente los métodos serán evaluados en chacras comerciales, con textura, profundidad de horizontes y contenido de carbono orgánico de suelo variables. En estos sitios, se monitoreará además el contenido de agua en el suelo en profundidad (usando sensores FDR o sondas de neutrones) y el grado de compactación del suelo mediante técnicas convencionales. Para esto se realizarán muestreos en grilla de resistencia a la penetración y densidad aparente en profundidad y caracterización del suelo mediante el método de perfil cultural. El tercer componente tendrá como objetivo evaluar el estado hídrico de las plantas a través de técnicas de sensoramiento remoto que permitan la cuantificación espacial. En concreto a través de la evaluación espacial de la temperatura de la canopia en relación con la temperatura ambiente. Para este trabajo se prevé utilizar un dron compuesto de una cámara FLIR (USA) que permita medir la superficie del cultivo. Se prevé poner puntos de control con diferentes superficies de temperatura conocida y varios sensores infrarrojos (Apogee, USA) para un registro cada 10 minutos de la temperatura del dosel. El contenido de agua del suelo se monitorizará con sensores FDR (Decagon) en profundidad, y con la utilización de carpas de exclusión de la precipitación removibles se prevé obtener diferentes contenidos de agua en el suelo, logrando así diferentes grados de estrés hídricos en las plantas.

Resultados, análisis y discusión

Componente 1.

Ensayo 1. Estudio de la dispersión espacial de la evapotranspiración actual dentro del pivot estimada a través de satélites y su relación con la evapotranspiración actual estimada a través de balance hídrico del suelo.

El METRIC permitió discriminar no solo la ETrF dentro de cada pivot sino también el comportamiento de la cobertura vegetal entre los 7 pivots seleccionados dentro de la cuenca de El Tala. Se evidencia como algunos de los pivot tienen la cobertura vegetal (cultivo) con un excelente comportamiento, mientras que

otros están en una posición intermedia y para finalizar en otros que tienen valores de ETrF muy bajos, que seguramente comprometen al cultivo en esta fecha del año (Figura 5). Por otro lado, estos valores se relacionan con la ETr24 total mostrando el consumo de agua del cultivo ese día en particular bajo los diferentes pivots, con valores desde 4-5 mm hasta valores de 8-10 mm de evapotranspiración real.

Ensayo 2. Cálculo de la evapotranspiración actual en la cuenca del El Tala estimada a través de satélites, con el método de balance de energía y el procedimiento METRIC®.

En el proceso de medir la ETr, ocurrida en la superficie vegetal, agua y suelo, mediante METRIC, el cálculo del flujo de calor sensible (H) dentro de la ecuación del balance de energía puede considerarse como la parte más sensible. Esta sensibilidad se debe a los efectos de diferentes elementos y a las conversiones durante su cálculo, lo que finalmente define la precisión de la ETr calculada [Allen et al. 2014].

La ETrF obtenida de $\frac{LE}{ET_0}$ de cada píxel se relacionó directamente con la evapotranspiración de referencia (ETr o ET₀). ETrF tiene un comportamiento similar al Kc descrito por Allen et al. (1998), que multiplicado por la ETr o ET₀ va a dar el valor de evapotranspiración real en 24 h (ETr24), calculada a partir de los datos registrados en la Torre EC. La ETrF varió entre valores de 0.10 en algunos puntos de campo natural hasta valores de 1 en condiciones de cultivo bajo riego. En campos sembrados con arroz este valor fue superior a 1, en un 10%, debido a la interferencia de los riegos en superficie, por el método de riego usado en Uruguay para el cultivo de arroz (Figura 4).

Componente 2.

Caracterización edafo-geofísicamente en diferentes escenarios productivos.

Resultados de la primera campaña:

- Los modelos geoeléctricos en los diferentes arreglos tienen un comportamiento similar entre sí en cada parcela. Los valores de resistividad de la primera capa (espesores desde 0.15 a 0.25 m) tienen cierta variabilidad espacial que puede ser debida a la heterogeneidad superficial del suelo.
- Las parcelas P2, P3 y P5 tienen una primera capa con resistividades medias con espesores del entorno de 0.20 m. Seguidamente la segunda capa tiene un comportamiento más homogéneo con valores bajos de resistividad. En cuanto a la resistencia a la penetración, las tres parcelas tienen un comportamiento similar. Una primera capa de espesor igual al observado en las imágenes de resistividad con valores medios de resistencia, seguido de una segunda capa con valores bajos que llega a profundidades de 0.50 m, profundidad a partir de la cual la resistencia a la penetración aumenta gradualmente.
- En el caso de la parcela P4, el suelo tiene características de deterioro visible (erosión). La primera capa geoeléctrica podría no estar presente o no tiene los mismos valores contrastantes que las mencionadas antes. Podría interpretarse como una única capa. En esta parcela, la resistencia a la penetración se caracteriza por ser elevada en los primeros 0.20 m y luego la misma disminuye hasta profundidades de 0.5 m a partir de la cual los valores vuelven a ascender gradualmente.
- Los mayores valores de resistividad se observan en la parcela P6, parcela que se caracteriza por tener las mejores condiciones estructurales por el manejo que se le realiza. Asimismo, es la parcela que más contenido de humedad en superficie posee. Esto contradice la relación inversa que, en general se cumple, de resistividad vs. humedad. Este efecto podría deberse a un mayor contenido de materia orgánica o a que el suelo por estar poco compactado (más suelto) el aire contribuye al efecto. En el caso de los valores arrojados por el penetrómetro, se observa que en superficie se tiene los menores valores de resistencia de penetración, los cuales aumentan luego de los 0.5 m al igual que sucede en el resto de las parcelas.

Resultados de la 2da campaña

Se utilizó al igual que en la campaña anterior un total de 24 electrodos con espaciamiento de 0,20m para un

transecto relevado de 4,80 m de longitud. Los arreglos utilizados en la adquisición fueron: Wenner alpha, Wenner Gamma, dipolo-dipolo y Schlumberger. Los datos de penetrometría se adquirieron con una separación de 0,60 m. Se midió la humedad en superficie en cada punto. Los datos de GPR se adquirieron longitudinalmente a las parcelas (entre surcos de plantas). En la imagen se muestra en verde los nuevos sitios relevados con Tomografía y Penetrómetro mientras que en amarillo las transectas de GPR.

- Los valores de resistividad de la primera capa (espesores desde 0.15 a 0.25 m) tienen cierta variabilidad espacial que puede ser debida a la heterogeneidad superficial del suelo.
- Las parcelas P2, P3 y P5 tienen una primera capa con resistividades medias con espesores del entorno de 0.20 m. Seguidamente la segunda capa tiene un comportamiento más homogéneo con valores bajos de resistividad hasta los 0.50 m, profundidad a partir de la cual la variable comienza a aumentar gradualmente. Una primera capa de poco espesor con valores medios de resistencia, seguido de una segunda capa con valores bajos que llega a profundidades de 0.50 m, profundidad a partir de la cual la resistencia a la penetración aumenta gradualmente.
- En el caso de la parcela P4, el suelo tiene características de deterioro visible (erosión). La primera capa geoelectrica podría no estar presente o no tiene los mismos valores contrastantes que las mencionadas antes. Podría interpretarse como una única capa. En esta parcela, la resistencia a la penetración no es tan elevada en los primeros 0.20 m como en la primera campaña. Si se mantiene el hecho que la resistencia vuelve a ascender gradualmente a partir de los 0.40-0.50 m.
- Los mayores valores de resistividad se observan en la primera capa de la parcela P6 (0.25 m de espesor), parcela que se caracteriza por tener buenas condiciones estructurales por el manejo que se le realiza. Seguidamente la segunda capa tiene un comportamiento más homogéneo con valores bajos de resistividad hasta los 0.37 m, profundidad a partir de la cual la variable comienza a aumentar gradualmente. En cuanto a la resistencia a la penetración, esta parcela tiene un comportamiento muy similar a las restantes, salvo que luego de los 0.50 m el aumento no es tan contrastante.

Componente 3 (maíz y pasturas)

Ensayo 1. Estudio de la variación de la temperatura de la canopia de la pastura con diferentes láminas de riego.

En los tratamientos evaluados el riego suplementario aplicado en pasturas en el litoral norte de Uruguay ha contribuido significativamente al aumento de la biomasa y a la longevidad de las pasturas en condiciones de déficit hídrico, especialmente en la primavera y verano.

En la festuca el riego suplementario no solo causó un aumento en la MS producida sino también en la longevidad de la misma, a pesar del aumento de la temperatura en verano, donde la festuca es altamente sensible a temperaturas altas. A pesar del aumento de la biomasa en la mezcla debido al riego, esta no sobrevivió al tercer año en un período estival de alta temperatura. El Paspalum tuvo una buena persistencia con el riego, y más allá del manejo de la primavera 2022, podría ser la especie con mayor potencial, teniendo en cuenta el primer año de implantación de la misma.

El índice CWSI-Idso, frecuentemente usado en regiones áridas y semiáridas, no tuvo el desempeño esperado, sin embargo, logró diferenciar relativamente las condiciones del régimen de riego entre los tratamientos y el valor del índice. En primer lugar, en los tres años evaluados, solo el 50% de los días en los cuales fue calculado pudieron ser utilizados (radiación solar superior a 700 w.m⁻² y déficit de presión de vapor mayor a 2 kPa), esto limita enormemente el uso del mismo si se pretende un uso diario del mismo.

En segundo lugar, y especial en condiciones de un estrés hídrico severo, como el desarrollado en la primavera y verano del tratamiento sin riego (secano), se registraron índices superiores a 1, que no deberían ser por la forma de cálculo, una de las explicaciones más viables es la disposición cenital de los

sensores y la influencia de la temperatura del suelo entre las plantas en la medida final del sensor, que integra toda la superficie.

Ensayo 2. Estudio de la variación de la temperatura de la canopia de maíz de grano con diferentes densidades de siembra y láminas de riego.

De la variable fisiológicas evaluadas, el IAF fue la variable que mejor reflejó la diferencia entre los tratamientos, destacándose una reducción significativa del IAF a partir de V12 en los tratamientos de secano (Fig. 3). El mayor período de estrés se observó de V12 en adelante, teniendo un período crítico a partir de FMR1 hasta R5 con pleno contenido de agua en el suelo. Las diferencias en IAF encontradas en R2 posteriormente se relacionaron con el rendimiento de los tratamientos. El índice SPAD directamente relacionado al contenido de clorofila de la hoja y en consecuencia de N, permitió discriminar los tratamientos de riego y secano con un alto estrés hídrico, pero no permitieron discriminar entre el resto de los tratamientos de riego, posiblemente debido al alto contenido de N usado en la fertilización, criterio que fue tomado para que el cultivo no tenga limitantes de N, en ningún momento de su desarrollo (Fig. 5).

No se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos de riego cuando se los analiza en conjunto con el tratamiento de secano, aumentando la variabilidad del experimento (Tabla 1), pero cuando se quita del análisis el tratamiento de secano comienzan a destacarse las diferencias entre las densidades de plantación y entre los tratamientos de riego (Tabla 2). En ambos ciclos el tratamiento de ETc50%-90 mil plantas fue el tratamiento significativamente menor en rendimiento que ETc100%-120 mil plantas (Tabla 2). La respuesta al rendimiento no tuvo el mismo orden de significancia entre los tratamientos durante los dos ciclos. Se observó una leve pero no significativo aumento del rendimiento medio en los tratamientos de 120 mil plantas respecto a 90 mil plantas. Era de esperar que el rendimiento de maíz de los tratamientos de ETc50% fueran significativamente menores que ETc100%, cosa que no sucedió en ninguno de los años.

La densidad de plantación no tuvo efectos sobre el número de hileras de granos o el número de granos por hilera (Tabla 3), tampoco se encontraron diferencias de estas variables entre los tratamientos de riego, evidenciando que no hubo factores abióticos que ocasionaran algún tipo de estrés durante la fase reproductiva del cultivo. Solo el secano, con un mayor estrés hídrico, provocó una reducción significativa en las hileras y en los granos en las filas. El peso promedio del grano presentó la misma tendencia, pudiendo el cultivar expresar todo su potencial genético, siendo afectado solo por el estrés hídrico ocasionado por el tratamiento de secano.

El CWSI discriminó en casi todas las medidas la situación de secano vs las situaciones con riego, y alcanzó valores mayores en el límite superior del índice en el secano de 120 mil plantas, indicando que las condiciones de estrés (falta de agua) fueron mayores y se manifestaron antes en el secano a 120 mil plantas, posiblemente debido a la mayor dotación de plantas y en consecuencia a un aumento en la velocidad de extracción de agua por la transpiración. La discriminación entre los tratamientos de riego no fue consistente en el primer año en todo el ciclo, en períodos de mayor demanda y estrés el índice discrimina bien, pero cuando el índice baja esta discriminación no es tan buena (Fig. 6), ejemplo 10/1/2022 vs 19/1/2022. El segundo ciclo del maíz esto caracterizado por una mayor demanda atmosférica y mayor déficit climático, donde el secano estuvo casi en el límite superior del índice en todo el ciclo y discriminó muy bien las diferencias entre tratamientos de riego. Es de hacer notar (Fig 8, CWSI-120 mil), que hubo un error en la aplicación el riego desde el 1/12/2022 hasta 28/12/2022, en el cual el tratamiento de ETc75%-120 mil recibió solo el equivalente a ETc50%-120 mil (línea verde) y el tratamiento de ETc50%-120 mil recibió el agua de ETc75%-120 mil (línea naranja). A pesar de este error operativo, el índice respondió muy bien al estado real de la planta. Posteriormente y corregido el error los tratamientos pudieron ser diferenciados apropiadamente.

Finalmente, en el primer ciclo pudieron ser usados 61 de los 82 días medidos, mientras que en el segundo ciclo solo 70 días en 102 medidos. Esta restricción sugerida para quitar efectos diarios de variaciones de nubosidad, precipitación y humedad relativa, puede ser una limitante al desarrollo de estos índices que deberá de seguirse evaluando.

Conclusiones y recomendaciones

Componente 1.

METRIC es un procedimiento robusto de cálculo de la ETr en base a balance de energía de la superficie terrestre a través de imágenes satelitales Landsat (7-8-9).

El procedimiento fue desarrollado con éxito y permite discriminar zonas de riego (mayor ETr), dentro de los pivot y fuera, que facilitan la toma de decisiones en las operaciones de riego. Por otro lado, permite la posibilidad de cuantificar las grandes extensiones del campo natural desde el punto de vista de la evapotranspiración real y en definitiva de su productividad.

Componente 2.

Los resultados preliminares del uso del georadar para determinar caracterizaciones geofísicas de suelos con diferentes sistemas de producción indican que hay una alta relación con el estado de conservación del suelo. Las zonas de baja resistividad eléctrica estarían correlacionándose con zonas donde la productividad es baja y donde la velocidad de infiltración de agua es baja. Asimismo, se observó que, en estas zonas, el espesor del horizonte A es muy pobre, a campo se verificó la presencia de erosión (cárcavas). La tomografía de resistividad eléctrica y el Georadar podrían estar identificando diferentes horizontes en el suelo, con discriminación por diferencia en textura o contenido de agua, cuestión que se deberá seguir estudiando.

Componente 3.

- En la festuca el riego mejoró la supervivencia de la pastura y aumentó significativamente el rendimiento de MS. Mientras que en la mezcla el riego aumento el rendimiento, pero el riego no fue suficiente para la sobrevivencia en el 3° año de la mezcla por excesos de temperaturas en la primavera y verano.
- La temperatura de la canopia del secano fue superior en todo el ciclo a la temperatura de las plantas con riego y del aire. La temperatura de la canopia en los tratamientos con riego fue superior a la del aire, posiblemente por el efecto directo del suelo sobre los sensores cuando la pastura estaba por menos de 10 cm de altura.
- El índice CWSI-Idso con valores superiores a 1, evidencian el efecto del suelo sobre los sensores. El índice discrimina aceptablemente los tratamientos de riego.
- Las restricciones ambientales para el uso de estos índices en el campo reducen los días en los cuales pueden ser utilizados en la programación del riego.
- Los dos ciclos evaluados se caracterizaron por un alto déficit hídrico climático, especialmente en el segundo ciclo 2022-2023.
- El tratamiento de secano, con suministro de agua solo por la lluvia, fue extremadamente intenso durante los dos períodos. En condiciones promedio climáticas de la zona, estos déficits no son habituales.
- Globalmente los cuatro índices calculados, discriminaron muy bien las diferencias entre los tratamientos, especialmente con el secano, el segundo ciclo con condiciones más demandantes de agua.
- La variación de los índices a nivel diario, durante el desarrollo del cultivo fue alta, y desde el punto de vista operativo, quizás sea deseable usar la acumulación de grados de DACT o DANS.
- El orden de los valores de $Dif T_c - T_a$, DACT y DANS se relacionaron con el rendimiento, especialmente si

sacamos al secano del análisis. Las pequeñas variaciones de estos índices luego se pudieron traducir en el rendimiento.

- Se evidenció la relación inversa entre el contenido de agua en el suelo (fracción del agua disponible del perfil) y el aumento de los valores de los índices CWSI, Dif Tc-Ta y DACT.

Referencias bibliográficas

Allen, R.G., 1998. FAO N° 56 Irrigation and drainage paper: Crop evapotranspiration, Rome, Italy.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (4), 380–394.

Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., Robison, C.W., 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (4), 395–406.

Allen, R.G. (2016). Reference Evaporation Calculator. Ref -ET. American Society of Civil Engineers, University of Idaho. <https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/research/water-resources/ref-et-software>

Allen, R.G. , Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D, Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Robison, C. 2019. EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine Written for presentation at the Emerging Technologies for Sustainable Irrigation A joint ASABE / IA Irrigation Symposium.

Allen, R.G., Trezza, R, Tasumi, M., Kjaersgaard, M. 2014. METRIC® Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration. Applications Manual for Landsat Satellite Imagery. Version 3.0 (April 2024). University of Idaho. Kimberly, Idaho. USA.

Bastiaanssen W G, 2000, SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey.

Dejonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión (2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

FAO. 2023. Remote sensing determination of evapotranspiration – Algorithms, strengths, weaknesses, uncertainty and best fit-for-purpose. Cairo. <https://doi.org/10.4060/cc8150en>

Idso, S.B. (1982) Non-water-stressed baselines - a key to measuring and interpreting plant water-stress. *Agric Meteorol* 27:59–70

Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, Pinter PJ Jr (1981) Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resour Res* 17:1133–1138

Jones, H.G. (2018). Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Ecophysiology. In: Sánchez-Moreiras, A., Reigosa, M. (eds) *Advances in Plant Ecophysiology Techniques*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978->

Massman, W.J. 2000. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology*.104, 185-198

Massman, W.J. y Lee, X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4): 121-144

MGAP, Uruguay. Modelo Digital del Terreno de Uruguay. 2024. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/tramites-y-servicios/servicios/modelo-digital-terreno>. Ultima entrada mayo 2024.

Ortega-Farías, S., Ortega-Salazar, S., Poblete, T., Kilic, A., Allen, R., Poblete-Echeverría, C.; Sepúlveda, D. 2016. Estimation of energy balance components over a drip-irrigated olive orchard using thermal and multispectral cameras placed on a helicopter-based unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 8(8), 638.

Payero, J. O., Neale, C. M., Wright, J. L. 2005. Estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass. *Applied engineering in agriculture*, 21(3), 401-409.

Ramírez-Cuesta, J. M., Intrigliolo, D. S., Lorite, I. J., Moreno, M. A., Vanella, D., Ballesteros, R., Buesa, I. 2023. Determining grapevine water use under different sustainable agronomic practices using METRIC-UAV surface energy balance model. *Agricultural Water Management*, 281, 108247.

Schontanus, P., Nieuwstadt, F.T.M. y de Bruin, H.A.R. 1983. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary Layer Meteorology*. 26, 81-93

Tasumi, M., Allen, R.G., Trezza, R., Wright, J.L., 2005a. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131 (1), 94–109.

Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G., Wright, J.L., 2005b. Operational aspects of satellite based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrig. Drain. Syst.* 19, 355–376.

Tasumi M, 2019, Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226, 105805. *Journal of hydrology*, 229(1-2), 87-100.

Taghvaeian, S., Comas, L.H., DeJonge, K.C., Trout, T.J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Agr. Water Manage.* 144, 69–80.

Twine, T.E. et al., 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3): 279-300.

USGS. National Land Classification system (NLCD) 2001.

Webb, E.K., G. Pearman y R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 106, 85-100

Wilczak, J., S. Oncley, y S. Stage. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99: 127-150

Licenciamiento

Reconocimiento 4.0 Internacional. (CC BY)