

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Ensayos de mezclas de cespitosas más sostenibles para jardinería pública

Sostenibilidad en las áreas verdes de
las ciudades "GO XEROCÉSPED"



Autor Principal: Pedro Vicente Mauri Ablanque (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), Finca El Encin, Autovía del Noreste A-2, Km. 38.200, 28800 Alcalá de Henares, Madrid, España)

Otros autores: José Fernando Marín Peira (Área Verde MG Projects SL., C/ Oña, 43 28933 Madrid, España; Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Producción Agraria, 28040 Madrid, España), Salima Yousfi (IMIDRA), Lorena Parra (Universitat Politècnica de València, Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (UPV), 46730 Grao de Gandia, Valencia, España; IMIDRA), Jaime Lloret (UPV).

ÍNDICE

1. Introducción
2. Material y métodos de los ensayos del GO Xerocésped
 - 2.1 Material vegetal
 - 2.2 Diseño experimental
 - 2.3 Imágenes digitales
 - 2.4 Dron Parrot
 - 2.5 Índice de vegetación NDVI
 - 2.6 Temperatura del dosel
 - 2.7 Humedad del suelo
 - 2.8 Análisis estadísticos
3. Resultados del GO Xerocésped
 - 3.1 El uso de las técnicas de teledetección y el control de riego en especies cespitosas
 - 3.2 Vuelos de dron y sus ventajas
 - 3.3 La comparación en el crecimiento de las diferentes mezclas cespitosas C₃-C₄ y la mezcla estándar (solo C₃) bajo riego deficitario
 - 3.4 La comparación entre las mezclas C₃-C₄ usando los índices de vegetaciones: GreenSeeker e imágenes digitales
 - 3.5 Índice del estado hídrico de las plantas: Pistola Infrarrojo
 - 3.6 Humedad del suelo (Sensor TDR 350)
 - 3.7 Comparación entre los datos del dron y las otras técnicas de teledetección
4. Conclusiones
5. Bibliografía

RESUMEN

En las últimas décadas, el aumento y la extensión del desarrollo de la industria en las grandes ciudades ha provocado un importante impacto en la contaminación del medio ambiente y una mala calidad del aire. Esta situación está aumentando de un año a otro con la disminución en las precipitaciones y el aumento de las emisiones de gases contaminantes. En este contexto, las praderas naturales y espacios verdes, tienen una capacidad natural muy grande para disminuir la contaminación en las ciudades y un impacto positivo en la vida de los ciudadanos. Los espacios verdes urbanos tienen muchas ventajas asociadas con el desarrollo urbano sostenible desde una perspectiva ecológica, social y económica. Sin embargo, el mantenimiento adecuado de estos espacios verdes requiere un riego regular y óptimo, criterio que es difícil de aplicar en muchas regiones donde la sequía y las altas temperaturas son frecuentes. Por todo ello, el objetivo principal del grupo operativo Xerocésped es la evaluación de diferentes mezclas cespitosas (C_3 - C_4 plantas) mejor adaptadas a la sequía para la formación de praderas con mayor sostenibilidad (cuidadas sostenibles) frente a una reducción en el agua de riego. Nuestro proyecto enfoca también sus líneas de investigación en la evaluación del empleo de nuevas tecnologías como el uso de sensores, dron y otras técnicas de teledetección que ayudan en la sostenibilidad de las praderas naturales con un seguimiento continuo del crecimiento de las plantas cespitosas y una mejor gestión de los recursos aplicados. Nuestros resultados obtenidos hasta el día de hoy, demuestran la existencia de mezclas C_3 - C_4 de césped muy resistentes al riego deficitario en comparación con la mezcla común de césped (formada solo con C_3) usada en la mayoría de los espacios verdes. Igualmente, los resultados del estudio muestran que las especies de céspedes C_4 tolerantes a la sequía y su combinación con especies C_3 rústicas, contribuye al desarrollo de espacios verdes urbanos con buena calidad a lo largo del año y con menor consumo de agua. Los resultados del proyecto destacan también la utilidad del dron, de los sensores y de las técnicas de teledetección en la evaluación del crecimiento del césped y la eficiencia del riego. Todas las variables obtenidas de estas técnicas como los índices de vegetación y parámetros relacionados con el estado de agua de las plantas nos han permitido discriminar entre las mezclas de césped y evaluar la eficiencia del riego. Tanto una buena elección de especies de césped como el uso de técnicas de teledetección tienen un efecto significativo en la sostenibilidad de las praderas naturales y pueden evitar costos innecesarios en el riego y ayudar en la protección del medio ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo y la industria han provocado un aumento en la contaminación ambiental en las grandes ciudades, un efecto que es muy probable que aumenta en el futuro debido al cambio climático, a la disminución de las precipitaciones y el aumento en la emisión de gases contaminantes. En este contexto, las praderas naturales y los espacios verdes urbanos tienen un papel importante en la disminución de la contaminación de las ciudades y un impacto positivo en la vida de los ciudadanos. Tanto las praderas naturales como los espacios verdes tienen muchas ventajas que benefician el progreso urbano sostenible desde una perspectiva de la protección del medio ambiente hasta numerosas ventajas económicas y sociales. Sin embargo, su mantenimiento adecuado requiere un riego regular y óptimo, requisito difícil de aplicar en muchas regiones donde la sequía y las altas temperaturas son frecuentes. Los autores [1] han informado en sus investigaciones que uno de los mayores obstáculos para el establecimiento y el

mantenimiento de espacios verdes es la escasez de agua. Otros autores han añadido que la calidad de los espacios verdes urbanos podría estar en riesgo con la reducción de las precipitaciones, así como con una mayor frecuencia y duración de las sequías [2]. Dado el alto nivel de deficiencia de agua en muchas áreas urbanas y el alto consumo de agua por el césped, es fundamental seleccionar mezclas alternativas de especies de césped que permitan un buen mantenimiento de pastizales con un menor consumo de agua. Asimismo, la selección de variedades de césped con resistencia superior a la sequía y un bajo consumo en agua es un medio principal para disminuir necesidades de agua de riego en los espacios verdes [3]. En este contexto, los requisitos del césped en consumo de agua se considera un criterio muy importante a la hora de seleccionar especies cespitosas más adaptadas a la falta de riego, particularmente en áreas y épocas en las que el agua necesaria para el desarrollo del césped y su mantenimiento está restringida [4]. Por lo tanto, la selección de plantas cespitosas con menores necesidades de agua y que pueden permanecer visualmente aceptables en condiciones secas podrían convertirse en plantas preferidas en un entorno urbano [5].

Por todo aquello, el objetivo principal del grupo operativo Xerocésped, financiado por el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) y el Fondo Europeo Agrario de Desarrollo Rural (FEADER) es la evaluación del comportamiento de diferentes mezclas de especies cespitosas frente al déficit de agua. El objetivo tiene como fin seleccionar las especies cespitosas más resistentes y mejores adaptadas al riego reducido manteniendo la calidad y el buen aspecto de la pradera en épocas críticas de sequía. El GO Xerocésped estudia la viabilidad del empleo de distintas combinaciones de gramíneas de clima cálido (C_4) y especies autóctonas de clima templado (C_3), para la formación de praderas con una mayor sostenibilidad frente a una reducción en el agua de riego, protegiendo de esta manera el medio ambiente y ayudando en la sostenibilidad de las áreas verdes en las ciudades sin perder calidad en su aspecto ni disponibilidad para su uso y disfrute. Los dos tipos de especies C_3 y C_4 que se evalúan en el GO se difieren en el sistema fotosintético para la absorción de dióxido de carbono. Una mayor absorción de CO_2 en las plantas C_4 permite tasas máximas de fotosíntesis en las hojas y una conductancia estomática más baja en comparación con las especies C_3 [6,7]. Además, las plantas C_4 se caracterizan con una menor transpiración y conservación de agua, especialmente en condiciones de calor cuando la demanda evaporativa es alta. Asimismo, los autores [8] concluyen en su investigación que las gramíneas C_4 se caracterizan por una mayor tasa de asimilación de CO_2 , mayor potencial hídrico y una menor conductancia estomática bajo sequía. Los mismos autores [8] informan que la conductancia estomática disminuye más dramáticamente en especies C_3 que C_4 bajo condiciones de sequía.

Por otra parte, el GO Xerocésped enfoca sus líneas de investigación en el empleo de nuevas tecnologías como el uso de sensores y de dron, así como otras técnicas de teledetección (Agricultura de precisión) para optimizar el seguimiento del crecimiento de las praderas y mantenerlas en un mejor estado fitosanitario, asociado a una mejor gestión de los recursos aplicados (objetivo de interés económico). De esta manera se pueden controlar los recursos aplicados a los espacios verdes (irrigación, fertilización, herbicidas), con aplicaciones en tiempos adecuados, con la cantidad apropiada y en el sitio correcto y permitiendo un buen mantenimiento de las praderas y una buena gestión económica. Actualmente, muchas investigaciones informan que la gestión del riego del césped utilizando las características espectrales de las plantas se usa mucho como un método eficaz para mejorar la eficiencia del riego [2]. Otros autores confirman que el análisis de los criterios espectrales se ha convertido en una parte crucial en el preciso manejo del césped y en un área activa de investigación [9, 10, 11]. Está muy bien conocido que el parámetro espectral más utilizado en las investigaciones de plantas es el índice de vegetación de

diferencia normalizada (NDVI). El NDVI es uno de los índices de vegetación más empleado en la agricultura de precisión, esta derivado de la teledetección óptica y se formula utilizando la siguiente ecuación: $(NIR - R) / (NIR + R)$, donde R es la reflectancia en la banda roja y NIR es la reflectancia en la luz del infrarrojo cercano. El NDVI (medido por el GreenSeeker) se ha utilizado ampliamente en la estimación de la biomasa vegetal [12,13]. Alternativamente, el uso de la información obtenida del color de las imágenes digitales (color rojo, verde, azul) para estimar la vegetación del dosel podrían representar una forma sustitutiva de las técnicas de espectroradiometría. El análisis de imágenes digitales se ha utilizado con éxito para evaluar el color del césped y el porcentaje de cobertura verde [14]. Además, la información de color de las imágenes digitales se puede utilizar con frecuencia para estimar el contenido de clorofila foliar y la concentración de nitrógeno [13] y la biomasa vegetal verde [15, 16].

Otras técnicas de teledetección usadas en estudios de irrigación, son aquellas relacionados con la temperatura del dosel. Tanto la temperatura medida con sensor infrarrojo o aquella obtenida a través de imágenes térmicas han sido muy importante a la hora de evaluar el crecimiento de plantas bajo diferentes regímenes de riego. Se ha comentado que el método particularmente utilizado para detectar el cierre de estomas inducido por estrés hídrico como guía para la programación del riego o la evaluación genotípica en condiciones de sequía es medir la temperatura del dosel utilizando termometría infrarroja [17] o termografía [18]. La temperatura del dosel puede proporcionar información sobre la transpiración como el principal contribuyente a la reducción de la temperatura de las hojas, y es una medida relativa de la transpiración de las plantas asociada con la absorción de agua del suelo y el enfriamiento de las hojas [19, 20]. Además de la temperatura del dosel, los sensores de humedad del suelo también pueden ayudar en la gestión del riego de cultivos. Esta prometedora tecnología podría conducir a una completa automatización del riego y lograr importantes ahorros de agua [21]. Según los autores [22] los sensores de humedad se encuentran entre los dispositivos más utilizados para administrar los esquemas de riego y mejorar la eficacia del riego en el césped.

Como se explicó en los párrafos posteriores, el objetivo principal del GO Xerocésped es encontrar mezclas cespitosas resistente al riego deficitario, y para desarrollar este objetivo el GO usa en sus ensayos todas estas técnicas de teledetección citadas y detalladas. Tanto los índices de vegetación (medidos por GreenSeeker y obtenidos de imágenes digitales), como la temperatura del dosel, el uso de sensores de humedad de suelo y vuelos de dron (equipado de dos cámaras digital y térmica) han sido las técnicas empleadas en los ensayos del GO.

2. MATERIAL Y METODOS DE LOS ENSAYOS DEL GO XEROCÉSPED

2.1 Material vegetal

Se realizaron ensayos de campo en el Instituto de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario de Madrid (IMIDRA) en Alcalá de Henares, Madrid. Se estudiaron seis mezclas de césped C₃-C₄. Para ello, mezclamos semillas de *Festuca arundinacea* y *Poa pratensis* (ambas C₃) con tres céspedes C₄, *Cynodon dactylon*, *Buchloe dactyloides* y *Zoysia japonica*, en una proporción 75:25 de C₃ a C₄. La descripción y características de las especies de césped utilizadas está en la Tabla 1. Las mezclas C₃-C₄ se compararon con una mezcla convencional (solo plantas C₃),

comúnmente empleada como testigo y formada por *Festuca arundinacea*, *Poa pratensis* y *Lolium perenne*.

Tabla 1. Descripción de las especies cespitosas C₃ y C₄ evaluadas en el GO Xerocésped

	Especies	Descripción
Plantas C₃		
	<i>Festuca arundinacea</i>	Altamente resistente al calor y la sequía debido a su extenso sistema radicular.
	<i>Poa pratensis</i>	Adaptable a varios suelos y climas y normalmente se utiliza en mezclas que le confiere mayor densidad
	<i>Lolium perenne</i>	Resistente a enfermedades, se adapta bien a climas extremos (calor y frío).
Plantas C₄		
	<i>Cynodon dactylon</i>	Es la especie de gramínea C ₄ más importante de climas cálidos. Resistente a largos periodos de sequía, se adapta a todo tipo de suelos y con estolones fuertes que le confieren alta capacidad de cobertura.
	<i>Buchloe dactyloides</i>	Especies de climas cálidos. Se adapta a todo tipo de suelos, prefiriendo sustratos alcalinos. Resistente a la sequía y la aridez. Peor adaptación a la sombra.
	<i>Zoysia japonica</i>	Especie de climas cálidos que muestran cierta tolerancia al frío. Prefiere el sol, pero puede tolerar un poco de sombra. Tolera el calor y la sequía.

Fuente: Dalmau Semillas: www.semillasdalmau.com y Zulueta semillas: www.zulueta.com.

2.2 Diseño experimental

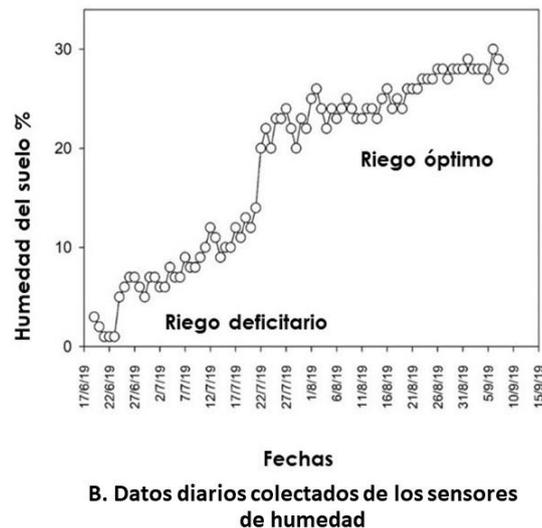
Se sembraron el 4 de abril de 2019 un total de 44 parcelas (siete mezclas de césped, tres repeticiones por mezcla y dos regímenes de agua) cada una de 3 m × 1,5 m (Fig. 1). Después de la germinación, se aplicó a las parcelas un riego deficitario durante dos meses (50% de la capacidad del contenedor). Posteriormente, se incrementó el riego para alcanzar un alto contenido de humedad del suelo (100% de la capacidad del contenedor) con el fin de evaluar el grado de regeneración de la biomasa verde de cada mezcla. El riego se aplicó con aspersores en bloques conectados por válvulas y controlados por el sistema de riego Rain Bird (Modelo ESP-LXME). La humedad del suelo fue controlada por sensores Plantae (Plantae, España) colocados en las parcelas experimentales y en la zona radicular activa (a una profundidad de 10 cm) y los datos se colectaron diariamente (Fig. 2). Se tomaron mediciones de los índices de vegetaciones y del estado hídrico de las parcelas, y se evaluaron vuelos de dron en los meses de riego deficitario seguidos de mediciones en los meses de riego alto.



Figura 1. Imagen tomada con el dron de las parcelas de césped del ensayo.



A. Modelo de los sensores Plantae para medir la humedad de suelo



B. Datos diarios colectados de los sensores de humedad

Figura 2. Modelo del sensor Plantae usado en los ensayos del GO Xerocésped para medir la humedad del suelo (A) y los datos de humedad registrados diariamente (B).

2.3 Imágenes digitales

Se tomaron imágenes digitales (Fig. 3) por parcela con una cámara SONY DSC-W120. Las imágenes se analizaron con el software de acceso libre BreedPix [23] que nos permite calcular el índice de vegetación de área verde (Green Area, GA; porción de píxeles con $60 < \text{Hue} < 120$ de la cantidad total de píxeles).



Figura 3. Toma de Fotos con la cámara Canon en las parcelas de césped.

2.4 Dron Parrot

Se realizaron vuelos de dron el mismo día que se tomaron las otras medidas de índices de vegetación y del estado de agua de las parcelas. El uso del Dron en el GO Xerocésped, es un método de gran eficacia y rapidez, que nos permite obtener información sobre el estado hídrico y fitosanitario de las parcelas en tiempo real y una mejor gestión del riego. El GO Xerocésped usa el dron BEBOP-PRO THERMAL (Fig. 4) equipado con dos cámaras, una cámara térmica FLIR One Pro y una cámara digital. El dron tiene 25 minutos de vuelo para cada batería y 2 km de rango de alcance. Se tomaron imágenes térmicas y digitales, estas últimas se procesaron también con el programa BreedPix para calcular el índice de vegetación GA.

2.5 Índice de vegetación NDVI

Se han realizado medidas del NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) con un espectroradiómetro portátil (Fig. 4; GreenSeeker, Trimble, EE. UU), en el mismo día que se tomaron las imágenes.

2.6 Temperatura del dosel

La temperatura del dosel (TD) se midió el mismo día que los índices de vegetación, utilizando un termómetro infrarrojo (Fig. 4; Fluke 561, China). Las medidas se tomaron por encima de las plantas, apuntando el termómetro láser en la dirección del dosel y con un metro de distancia

aproximadamente. Además, a partir de los vuelos del dron hemos tomado también imágenes térmicas de las parcelas.



Parrot BEBOP-PRO THERMAL



TDR 350. Sensor de la humedad del suelo



Termómetro infrarrojo



Sensor GreenSeeker

Figura 4. Los diferentes instrumentos utilizados en los ensayos del GO Xerocésped.

2.7 Humedad del suelo

Aparte de la humedad de suelo registrada con los sensores Plantae, se midió la humedad del suelo (HS) con un sensor de reflectometría en el dominio del tiempo de Field Scout 350 (Fig 4; TDR 350, Spectrum Technologies, Inc. EE. UU). Las mediciones se realizaron en el mismo día que los otros parámetros con unas varillas TDR de 7 cm y en tres sitios en cada parcela. Se tomó la media de las tres medidas como dato de cada parcela.

2.8 Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis factoriales de varianza (Anovas) para evaluar efecto del riego en las diferentes mezclas de césped estudiadas. Las medias fueron comparadas por la diferencia honestamente significativa de Tukey (HSD). Se realizaron correlaciones con dos variables para analizar las relaciones entre los diferentes índices de vegetación y la temperatura del dosel. Los análisis estadísticos se realizaron con IBM SPSS Statistics 24 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.). Las figuras se crearon usando Sigma-Plot 11.0 para Windows (Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EE. UU).

3. RESULTADOS DEL GO XEROCÉSPED

3.1. El uso de las técnicas de teledetección y el control del riego en especies cespitosas

Todos los índices de vegetación evaluados en nuestro estudio fueron muy eficaces como indicadores de las diferencias entre el riego aportado a las parcelas de césped (Tabla 2). Tanto NDVI, como los dos índices GA (biomasa verde obtenidos de las imágenes terrestres y aquella de las imágenes del dron) han disminuido bajo el riego deficitario. Asimismo, los valores de humedad del suelo (HS) medidas por el sensor TDR 350 bajo el riego óptimo fueron el doble que bajo el riego limitado (Tabla 2), confirmando la eficiencia del sensor TDR 350 como un buen instrumento para la estimación de la humedad del suelo. Igualmente, la temperatura del dosel (TD) medidas por el termómetro infrarrojo fue más alta en el riego deficitario indicando un estrés hídrico en las parcelas de césped.

Tabla 2. Efecto del riego en NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), GA Imágenes terrestre (área verde calculada a partir de imágenes digitales terrestres), GA Imágenes dron (área verde calculada a partir de imágenes del dron), temperatura del dosel (TD) y la humedad del suelo (HS). La ANOVA con los niveles de significancia ($*** p < 0.001$) están presentados.

	Riego deficitario	Riego alto	Anova significación
NDVI	0.65	0.80	0.000***
GA <small>Imágenes terrestre</small>	0.52	0.79	0.000***
GA <small>Imágenes dron</small>	0.49	0.82	0.000***
TD	20.00	14.26	0.000***
HS	26.22	47.36	0.000***

3.2 Vuelos de dron y sus ventajas

Hoy en día, el uso del dron está teniendo un papel importante en la gestión y manejo de los cultivos. Tanto las imágenes digitales como las térmicas obtenidas por la cámara del dron son esenciales para la gestión del agua de varios cultivos y espacios verdes. En este contexto, nuestros resultados confirman la utilidad de las imágenes de dron para detectar el estrés hídrico en las parcelas cespitosas. Las imágenes digitales tomadas con el dron bajo el riego limitado mostraron una heterogeneidad en la cobertura en biomasa verde del césped bajo riego deficitario (Fig. 4). La falta de riego provocó zonas secas en las parcelas y ausencia de vegetación. Asimismo, las imágenes térmicas tomadas por el dron (bajo déficit hídrico) mostraron zonas con mayor temperatura del dosel en las parcelas (Fig. 5). Sin embargo, las imágenes digitales y las térmicas tomadas por el dron cuando aplicamos un riego óptimo, mostraron una biomasa verde alta con una uniformidad en las parcelas de césped y una temperatura del dosel más baja indicando un buen estado hídrico de las plantas (Fig. 5).

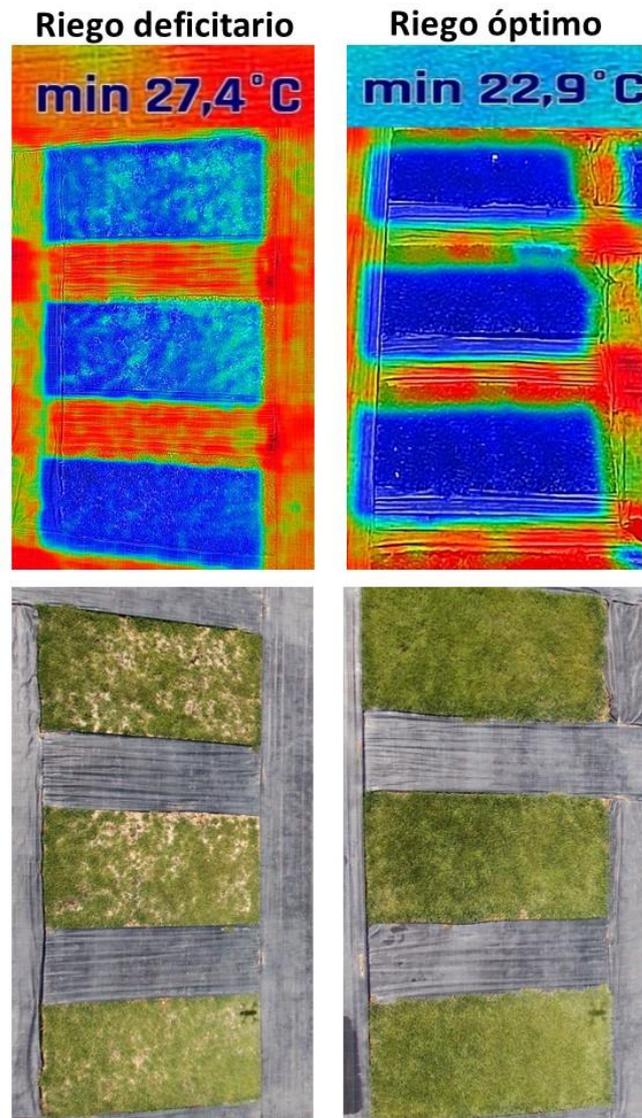


Figura 5. Imágenes Térmicas (arriba) y digitales (abajo) tomadas por el dron en las parcelas de césped bajo riego deficitario y óptimo.

3.3 La comparación en el crecimiento de las diferentes mezclas cespitosas C_3 - C_4 y la mezcla estándar (solo C_3) bajo riego deficitario

Se examinaron las diferencias de crecimiento bajo el riego el deficitario entre las 7 mezclas usando los índices de vegetación o biomasa verde. Los resultados mostraron que la mezcla común formada solo por plantas C_3 presenta los valores más bajos de NDVI y índice de biomasa verde (calculado a partir de las imágenes digitales), mientras las mezclas C_3 - C_4 mostraron valores más altos de índices de vegetación (Fig. 6).

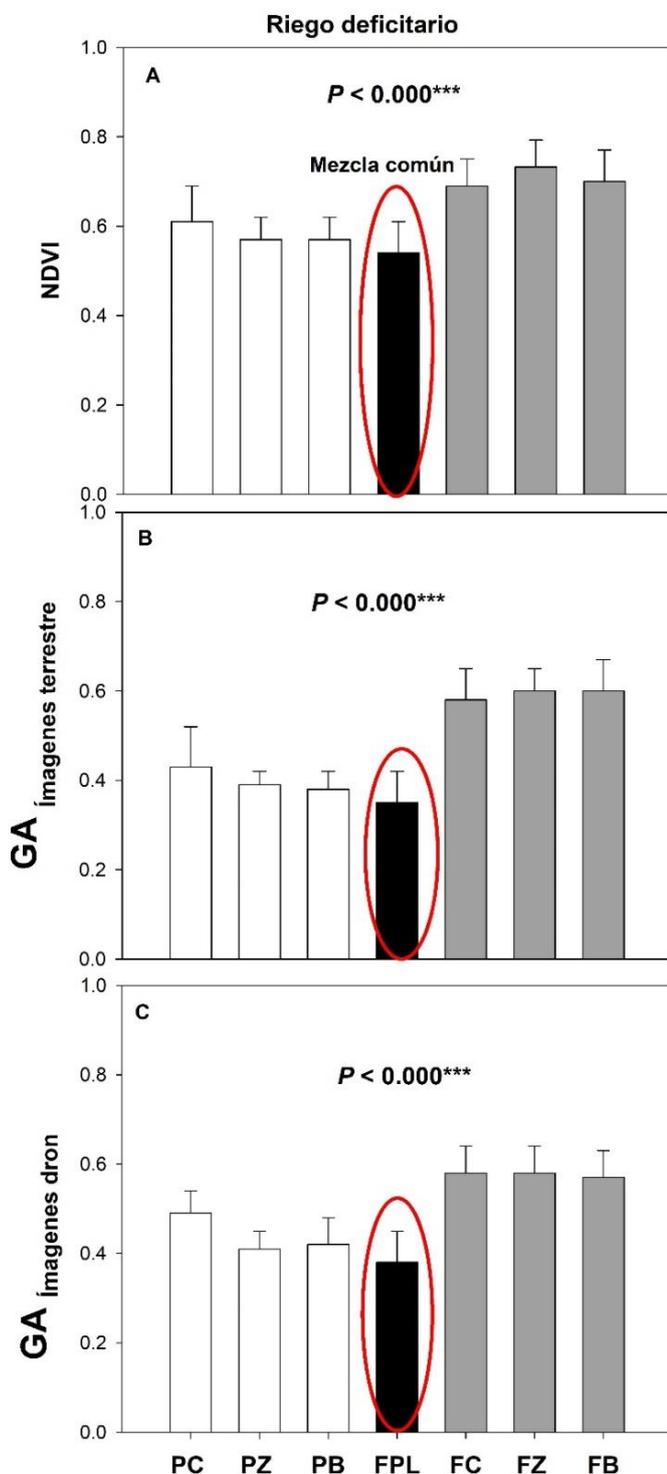


Figura 6. Comparación entre los índices de vegetación NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), GA imágenes terrestre (área verde calculada a partir de imágenes digitales terrestres), GA imágenes dron (área verde calculada a partir de imágenes RGB del dron) de las siete mezclas estudiadas: PZ: Poa-Zoysia; PB: Poa-Buchloe; PC: Poa-Cynodon; FPL: Festuca-Poa-Lolium; FZ: Festuca-Zoysia; FB: Festuca-Buchloe; FC: Festuca- Cynodon.

La comparación entre las especies de césped concluye que las mezclas C₃-C₄ pueden mantener mejor su crecimiento en condiciones de riego limitado en comparación con la mezcla estándar C₃, debido a la morfología (hojas y raíces) y al metabolismo fotosintético de las especies C₄, que tienen una mejor resistencia a las altas temperaturas y a la falta de agua en los meses del verano (especies de climas cálidos). Mientras que el césped de especies C₃ (aunque que son resistentes a la sequía), su metabolismo fotosintético es muy diferentes al de las plantas C₄, y en algunas épocas del año (verano) con las altas temperaturas y la falta de agua (precipitaciones muy bajas) no pueden adaptarse a un déficit de agua continuo.

3.4 La comparación entre las mezclas C₃-C₄ usando los índices de vegetaciones: GreenSeeker e imágenes digitales

Además, los resultados del GO mostraron que los índices de vegetación proporcionaron una buena separación entre las seis mezclas C₃-C₄ de césped bajo los dos regímenes hídricos (Fig. 7). Las mezclas de Festuca con las tres especies C₄ mostraron índices de vegetación más altos bajo el riego limitado en comparación con las mezclas C₄ con Poa. Por lo contrario, las mezclas de Poa mostraron mejores índices de vegetación que las mezclas de Festuca bajo riego alto (Fig. 7). Este resultado muestra el crecimiento superior de las tres mezclas de Festuca con césped C₄ bajo el estrés hídrico (mayor NDVI, y mayor biomasa verde estimada con las imágenes digitales terrestre y de dron) en comparación con las mezclas de Poa. Sin embargo, la regeneración de biomasa verde en condiciones de riego óptimo, después de un estrés hídrico, es más alta en las mezclas de Poa.

Asimismo, los datos obtenidos de las técnicas de teledetección mostraron un patrón interesante en las características espectrales dentro de cada grupo de las mezclas C₃-C₄. Los índices de vegetación revelaron que las tres mezclas de Festuca con Cynodon, Buchloe y Zoysia mostraron un patrón de crecimiento similar bajo el riego deficitario, mientras que bajo el riego alto Festuca-Buchloe y Festuca-Zoysia superaron ligeramente a Festuca-Cynodon. Sin embargo, los datos de NDVI y biomasa verde estimada con las imágenes revelaron diferencias significativas bajo los dos regímenes de agua en el caso de las mezclas de Poa con las tres especies C₄ (Fig. 7). Hemos observado que la mezcla Poa-Cynodon tenía mejores índices de vegetación bajo el riego deficitario, mientras que bajo el riego óptimo las mezclas Poa-Buchloe y Poa-Zoysia superaron a Poa-Cynodon, con Poa-Buchloe mostrando el mejor crecimiento bajo esta condición.

Sobre la base de estos resultados preliminares del GO, podemos concluir que las mezclas de Festuca con Cynodon, Buchloe o Zoysia tienen una tolerancia similar al déficit hídrico y serían adecuadas para regiones con disponibilidad limitada de agua. Mientras que, para las mezclas con Pao, es preferible usar la mezcla Poa-Cynodon bajo condiciones de déficit hídrico. Sin embargo, bajo las condiciones sin escasez de agua, las mezclas Festuca-Buchloe y Festuca-Zoysia pueden ofrecer una mejor calidad de césped. De esta manera, las mezclas Poa-Zoysia y Poa-Buchloe serían las más adecuadas en tales climas debido a su alta calidad en condiciones óptimas de cultivo.

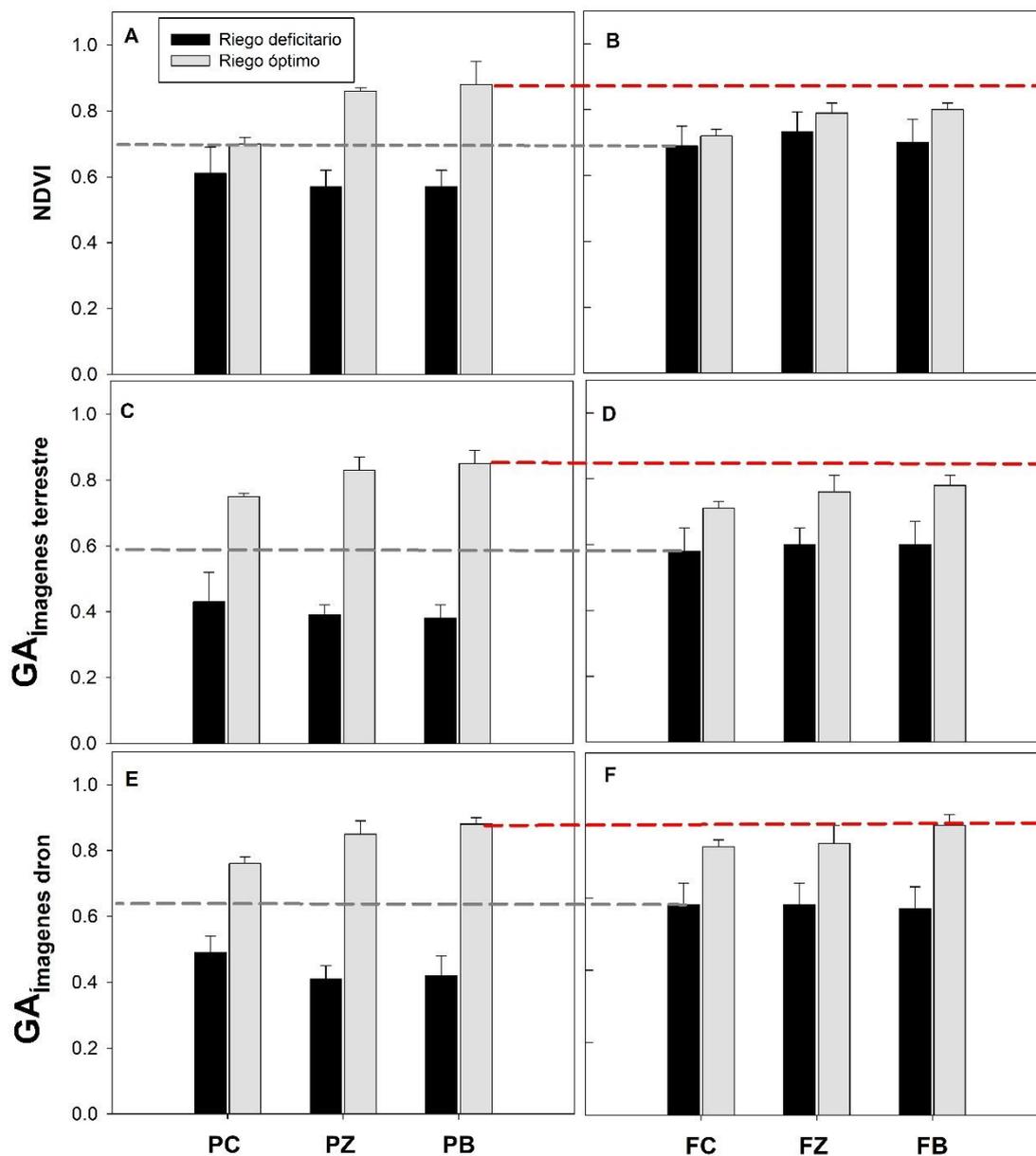


Figura 7. Comparación entre los índices de vegetación de las seis mezclas C₃-C₄. Las abreviaciones de las mezclas y de las variables están explicadas en la Figura 6.

3.5 Índice del estado hídrico en las plantas: Pistola Infrarrojo

La temperatura del dosel (TD, también conocido como temperatura de la hoja) se ha utilizado ampliamente en muchos trabajos de investigación para estimar el estrés hídrico de las plantas y para proporcionar una medida relativa de la transpiración de las plantas. Los resultados del GO mostraron que la TD de las mezclas de césped, medida con un termómetro infrarrojo, fueron altas bajo el riego limitado, indicando un estado de estrés hídrico en las plantas. Sin embargo, en las condiciones de riego óptimo, observamos temperaturas bajas indicando mejor flujo del agua en las hojas y mejor estado hídrico. Igualmente, como en el caso de los índices de vegetación, la mezcla estándar tenía la temperatura del dosel más alta bajo el riego deficitario, confirmando que es la mezcla más sensible a las épocas de falta de agua.

Respecto a la comparación entre mezclas C₃-C₄, nuestros resultados mostraron que, bajo el riego limitado, la mezcla de Festuca con los tres céspedes C₄ mostró una TD más baja (mejor tolerancia al estrés hídrico) en comparación con las mezclas de Poa. En este contexto, *Festuca arundinacea* es más eficiente en el uso del agua bajo condiciones de riego limitado que las otras especies de césped. Además, nuestros resultados han demostrado que entre las tres mezclas de Festuca con C₄ y bajo el riego limitado la mezcla Festuca-Cynodon tenía la temperatura de dosel (TD) más baja (mejor estado hídrico) que las dos otras mezclas.

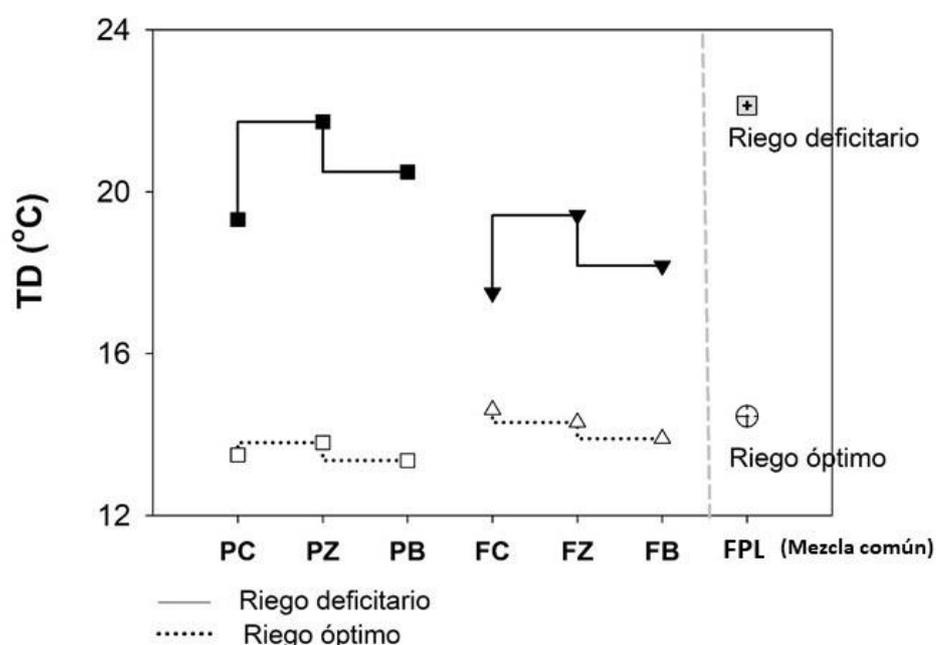


Figura 8. Comparación la temperatura del dosel (TD) de las seis mezclas C₃-C₄ y la mezcla estándar estudiados. Las abreviaciones de las mezclas están explicadas en la Figura 5.

Igualmente, las comparaciones de la TD entre las mezclas con Poa, mostraron que Poa-Cynodon mostró mejor estado hídrico de las hojas (bajas TD). En este contexto, muchos estudios demostraron también que las cutículas gruesas de las hojas (morfología de hojas) y la tasa de transpiración de agua más baja de *Cynodon dactylon* le confieren una mejor tolerancia al estrés hídrico en comparación con otras especies de césped.

3.6 Humedad del suelo (Sensor TDR 350)

Los datos de la humedad del suelo (HS) medidos por TDR 350 en el estudio del GO Xerocésped demostraron una diferencia entre el crecimiento del césped bajo los dos regímenes de riego (Tabla 2). TDR 350 marco valores muy bajas en el riego deficitario, mientras bajo el riego alto los valores aumentaron hasta el doble. Sin embargo, nuestros resultados no han mostrado ninguna diferencia significativa entre las mezclas de césped usando los datos de TRD como variables ($p < 0.400$). En este contexto, podemos decir que estos sensores de humedad pueden indicar cuando el suelo está lleno de agua o seco y, por lo tanto, se mantiene un césped saludable al evitar el estrés de las plantas causado por un suelo demasiado seco o demasiado regado (asfixia de las plantas). Podemos sugerir el uso de los sensores de la humedad del suelo como un instrumento útil para manejar el riego del césped, para gestionar las cantidades de agua aportada e informar sobre la eficacia del riego.

3.7 Comparación entre los datos del dron y las otras técnicas de teledetección

Tanto los índices de vegetación (NDVI y la biomasa verde calculada a partir de las imágenes digitales) mostraron correlaciones altas y positivas entre ellos (Tabla 3), confirmando que estos índices nos informan sobre el estado de la biomasa de una manera comparable. Asimismo, la correlación alta entre la TD y los índices de vegetación (Tabla 3), nos indica que la pistola infrarroja puede ser una medida muy eficaz para la estimación del estado verde de las plantas y viceversa.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre los diferentes índices de vegetación (NDVI, GA Imágenes terrestre, GA Imágenes dron) y la temperatura del dosel (TD). Los regímenes hídricos y las especies de césped se analizaron juntos. Niveles de significancia: *** $p < 0.000$. Las abreviaciones de las variables están explicadas en la Tabla 2.

	NDVI	GA Imágenes RGB terrestre	GA imágenes RGB dron	TD
NDVI		0.64***	0.71***	-0.68***
GA Imágenes RGB terrestre			0.82***	0.77***
GA imágenes RGB dron				0.76***

La tabla 3, muestran que los datos obtenidos de los vuelos de dron correlacionaron altamente con los otros parámetros de teledetección manuales (GreenSeeker y la pistola infrarroja). Podemos considerar según estos resultados, que el uso de los índices de vegetación espectral derivados de las imágenes de dron como una técnica muy rápida y eficaz para el fenotipado de las plantas cespitosas y el control y la gestión del riego.

En la actualidad, muchos drones de bajo coste están disponibles para tomar imágenes de grandes superficies de cultivos en poco tiempo. Consideramos, el uso de esta herramienta como una

estrategia eficaz a la hora de gestionar los requisitos en agua de las zonas verdes. El dron permite aumentar en gran medida la eficacia de la colección de datos en espacios verdes grandes, en poco tiempo ayudando de esta manera a resolver los problemas en el campo a tiempo real. Además, los resultados de comparación entre mezclas, han sido coherentes entre las imágenes de dron en comparación con NDVI, pistola infrarroja y las imágenes terrestres, resultado que nos permite confirmar la confiabilidad de las mediciones basadas en vuelos de dron para seleccionar especies tolerantes a la sequía en grandes áreas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados del GO Xerocésped obtenidos hasta el día de hoy, demuestran la importancia de la selección de especies de césped con mayor resistencia a la sequía o bajo consumo en agua para disminuir las necesidades de riego en las praderas naturales y espacios urbanos verdes. En este contexto, los resultados confirmaron la alta calidad de las mezclas de césped C₃ con las especies C₄ (plantas de clima cálido) en condiciones de riego deficitario. La selección de céspedes C₄ tolerantes a la sequía y su combinación con especies rústicas C₃ puede permitir tener espacios verdes con mejor calidad y apariencia durante todo el año y especialmente en verano (época crítica de riego) donde las plantas C₄ pueden tolerar altas temperaturas y un menor aporte en agua de riego.

Además, los resultados del GO Xerocésped confirman la eficacia del uso de dispositivos económicos de teledetección (sensores remotos) para el manejo del riego del césped. Tanto los índices de vegetación (derivado del GreenSeeker o de una cámara digital), la temperatura del dosel (medida por termometría infrarroja) y la humedad del suelo (obtenida por sensores de suelo) confirman la eficiencia de estos parámetros en el mantenimiento del césped. Por lo tanto, la accesibilidad, la facilidad de uso y el bajo coste de estos instrumentos los convierte en unos dispositivos perfectos para la gestión del agua del césped y la estimación de la biomasa verde, principalmente en condiciones de cultivo limitadas y cuando las plantas sufren un estrés hídrico agresivo. Por otra parte, el seguimiento en tiempo real del crecimiento de las praderas y espacios verdes mediante imágenes aéreas de dron, se considera una técnica accesible, no tan cara (drones de bajo coste) y muy fiable para el monitoreo de espacios verde de grandes superficies, por una parte, y por otra para las estrategias de programas de mejora de las especies cespitosas bajo sequía. El dron puede volar una gran superficie de pastizales en poco tiempo y diagnosticar las áreas secas debido a la falta de riego o las áreas con exceso de riego debido a la ineficiencia del riego. Asimismo, los parámetros de vegetación y el estado hídrico (imágenes térmicas) derivadas de vuelos de dron permiten observar diferencias en el comportamiento de diferentes especies cespitosas para seleccionar aquellas con mejor adaptación a las condiciones climáticas severas.

Todas estas técnicas y dispositivos de teledetección son estrategias eficaces a seguir por contribuir en la sostenibilidad de las praderas naturales y en la protección del medio ambiente. Podemos decir que tanto una buena elección de especies de césped tolerantes al riego deficitario como el uso de técnicas de teledetección tienen un efecto significativo en la sostenibilidad de las praderas naturales y espacios urbanos verde y pueden evitar costos innecesarios de riego y ayudar en la prevención del medio ambiente.

FINANCIACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto XEROCÉSPED del GO XEROCÉSPED está cofinanciado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) – Europa invierte en zonas rurales, el MAPAMA, y la Comunidad de Madrid a través del IMIDRA, en el marco del PDR-CM 2014-2020.



Unión Europea
Fondo Europeo Agrícola
de Desarrollo Rural
Europa invierte en las zonas rurales

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Schebella, M.F.; Weber, D.; Brown, G.; Hatton MacDonald, D. The importance of irrigated urban green space: Health and recreational perspectives. Technical Report; Goyder Institute for Water Research: Adelaide, Australia, 2014.
- [2] Krum, J.; Carrow, R.N.M.; Karnok, K. Spatial mapping of complex turfgrass sites: Site-specific management units and protocols. *Crop Sci.* 2010, 50, 301–315.
- [3] Kenna, M.R.; Horst, G.L. Turfgrass water conservation and quality. *Inter. Turf. Soc. Res. J.* 1993, 7, 99–113.
- [4] Jansen van vuuren, J.D. Optimal Use of Turf Grass; Water Research Commission: Pretoria, South Africa, 1997.
- [5] Domenghini, J.C.; Bremer, D.J.; Fry, J.D.; Davis, G.L. Evapotranspiration and Performance among Turfgrass and Ornamental Landscape Species in Response to Irrigation Deficit. *Inter. Turf. Soc. Res. J.* 2013, 12, 405–414.
- [6] Osmond, C.B.; Winter, K.; Ziegler, H. Functional significance of different pathways of CO₂ fixation in photosynthesis. In *Encyclopedia of Plant Physiology: New Series*; Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 1982; pp. 479–547.
- [7] Ehleringer, J.; Pearcy, R.W. Variation in quantum yield for CO₂ uptake among C₃ and C₄ plants. *Plant Physiol.* 1983, 73, 555–559.
- [8] Taylor, S.H.; Ripley, B.S.; Woodward, F.I.; Osborne, C.P. Drought limitation of photosynthesis differs between C₃ and C₄ grass species in a comparative experiment. *Plant. Cell Environ.* 2011, 34, 65–75.
- [9] Caturegli, L.; Lulli, F.; Foschi, L.; Guglielminetti, L.; Enrico Bonari, E.; Volterrani, M. Turfgrass spectral reflectance: Simulating satellite monitoring of spectral signatures of main C₃ and C₄ species. *Precis. Agric.* 2014, 16, 297–310.

- [10] Marín, J.; Yousfi, S.; Mauri, P.V.; Parra, L.; Lloret, J.; Masaguer, A. RGB vegetation indices, NDVI and biomass as indicators to evaluate C3 and C4 turfgrass under different water conditions. *Sustainability*. 2020, 12, 2160. <https://doi.org/10.3390/su12062160>.
- [11] Parra, L.; Marín, J.; Yousfi, S.; Rincón, G.; Mauri, P.V.; Lloret, J. The Use of Edge Detection Technique for the Recognition of Weed in Lawns. *Comput. Electron. Agri.* 2020. DOI:10.1016/j.compag.2020.105684.
- [12] Babar, M.A.; Reynolds, M.P.; Van Ginkel, M.; Klatt, A.R.; Raun, W.R.; Stone, M.L. Spectral reflectance indices as a potential indirect selection criteria for wheat yield under irrigation. *Crop Sci.* 2006, 46, 578-588.
- [13] Martí, J.; Bort, J.; Slafer, G.A.; Araus, J.L. Can wheat yield be assessed by early measurements of normalized difference vegetation index? *Ann. Appl. Biol.* 2007, 150, 253-257.
- [14] Karcher, D.E.; Richardson, M.D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. *Crop Sci.* 2003, 43, 943-951.
- [15] Montes, J.M.; Melchinger, A.E.; Reif, J.C. Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends Plant Sci.* 2007, 12, 433-436.
- [16] Yousfi, S.; Kellas, N.; Saidi, L.; Benlakhel, Z.; Chaou, L.; Siad, D. Comparative performance of remote sensing methods in assessing wheat performance under Mediterranean conditions. *Agric. Water Manag.* 2016, 164, 137-147.
- [17] Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter, P.J.; Reginato, R.J.; Hatfield, J.L. normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 1981, 24, 45-55.
- [18] Jones, H.G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Adv. Bot. Res.* 2004a, 41, 107-163.
- [19] Reynolds, M.P.; Dreccer, F.; Trethowan, R. Drought adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *J. Exp. Bot.* 2007, 58, 177-186.
- [20] Araus, J.L.; Slafer, G.A.; Royo, C.; Serret, M.D. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2008, 27, 377-412.
- [21] Millán, S.; Casadesús, J.; Campillo, C.; Moñino, M.J.; Hénar Prieto, M. Using soil moisture sensors for automated irrigation scheduling in a plum crop. *Water*. 2019, 11, 2061. doi:10.3390/w11102061.
- [22] Parra, M.; Parra, L.; Lloret, J.; Mauri, P.V.; Llinares, J.V. Low-cost Soil Moisture Sensors Based on Inductive Coils Tested on Different Sorts of Soils. In the 2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), Granada, Spain. (pp. 616-622). IEEE.
- [23] Casadesús, J.; Biel, C.; Savé, R. Turf color measurement with conventional digital cameras. In EFITA/WCCA Joint Congress in Agriculture; Boaventura Cunha, J., Morais, R., Eds.; Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro: Vila Real, Portugal, 2005; pp. 804-811.