

## Estimación de la profundidad radicular de cultivos hortícolas a partir de imágenes de la cubierta vegetal para su empleo en gestión del riego

D. Escarabajal-Henarejos <sup>(1)</sup>, J.M. Molina-Martínez <sup>(1)</sup>, G. García-Mateos <sup>(2)</sup>,  
A. Ruiz-Canales <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Investigación en Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena. Pº Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena, Murcia. david.escarabajal@gmail.com

<sup>(2)</sup> Departamento de Informática y Sistemas. Facultad de Informática. Universidad de Murcia. Campus Universitario de Espinardo, s/n, 30100 Espinardo, Murcia

<sup>(3)</sup> Departamento de Ingeniería. Área de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Universidad Miguel Hernández de Elche. Ctra. de Beniel, km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante

### RESUMEN

El balance hídrico es una metodología ampliamente utilizada en diversos sistemas de programación automática del riego, básicamente en cultivos intensivos y sistemas de microirrigación. Un aspecto de gran importancia para la aplicación del balance hídrico es conocer la profundidad del sistema radicular de la planta, pues permite acotar el volumen de suelo a considerar en dicho balance. En la mayoría de ocasiones, la evolución real de este parámetro no es considerada, recurriéndose a utilizar valores fijos tabulados o propuestos por la bibliografía, hecho que provoca que los valores considerados no se correspondan con los reales, generando situaciones de estrés hídrico o sobresaturación del perfil del suelo, que afectan al normal desarrollo del cultivo. La profundidad radicular es un parámetro que puede ser estimado a partir de fotografías digitales del dosel vegetal, al observarse una excelente relación entre este parámetro y la fracción de cobertura vegetal, éste último directamente relacionado también con el desarrollo del cultivo y su demanda evapotranspirativa. En base a esta relación, se han obtenido modelos matemáticos para la estimación del espesor de la zona radicular de un cultivo de lechuga variedad 'Little Gem', utilizando la fracción de cobertura vegetal como variable de entrada en el modelo, obtenida a partir del procesamiento informático de imágenes digitales de la cubierta vegetal. Su implantación en un sistema automatizado de gestión del riego permitirá la optimización hídrica, al ajustar el contenido hídrico del suelo a la zona realmente explorada por las raíces.

**Palabras clave:** balance hídrico; fracción de cobertura vegetal; modelo de simulación; fotografía digital; procesamiento de imágenes

### 1. Introducción

Entre los métodos disponibles para conocer el estado hídrico del suelo, el balance hídrico resulta una herramienta fundamental en la ordenación científica de los recursos hídricos y, por lo tanto, para la sostenibilidad productiva y ambiental de la agricultura.

Esta metodología, basada en el equilibrio entre las entradas y salidas de agua en el perfil de suelo explorado por las raíces, ha sido ampliamente utilizada tanto a gran escala, para evaluar la cantidad y disponibilidad de recursos hídricos en cuencas hidrográficas [1], como a nivel de parcela para estimar la disponibilidad de agua para las plantas y llevar a cabo la programación del riego en base al contenido hídrico del suelo [2].

La importancia de realizar un seguimiento del estado hídrico de los cultivos reside en la

posibilidad de poder evaluar en cada momento el consumo hídrico particular del cultivo en cada una de sus etapas y el estado de las reservas en los periodos críticos.

Una variable del desarrollo vegetativo de los cultivos es la profundidad del sistema radicular. Su papel en el balance hídrico viene determinado por la necesidad de conocer el perfil de suelo explorado por el sistema radicular, en el cual es necesario mantener unas condiciones óptimas de humedad para el correcto desarrollo del cultivo [3]. La profundidad radicular está relacionada directamente con la tasa de profundización de las raíces, específica de cada cultivo, y con la textura del suelo, pues ésta determina la resistencia mecánica que ofrece el suelo al desarrollo radicular [4]. La profundidad radicular es una variable de entrada en los sistemas de programación del riego, que suele ser resuelta

mediante el empleo de valores fijos tabulados o propuestos por la bibliografía.

Se ha observado una excelente relación entre la profundidad radicular ( $z$ ) y otro parámetro de desarrollo del cultivo, la fracción de cobertura vegetal ( $F_c$ ). Generalmente, la determinación de  $F_c$  se lleva a cabo mediante el empleo de técnicas de procesamiento digital de fotografías aéreas de la cubierta vegetal [5,6], orientada a estimar los requerimientos hídricos del cultivo, dada su relación directa con el coeficiente de cultivo  $K_c$ , empleado en la determinación de la evapotranspiración de los cultivos según la metodología FAO-56 [7]. Así pues,  $F_c$  también se comporta como una variable capaz de predecir la profundidad radicular de la planta mediante el empleo de un modelo matemático predictivo, dada la buena relación existente entre ambos parámetros. La implantación de este modelo en un sistema automático de programación del riego a tiempo real permitirá un mejor control y distribución del agua de riego, optimizando el recurso agua.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo matemático capaz de predecir el espesor de la zona radicular de un cultivo de lechuga variedad 'Little Gem' a partir de la fracción de cobertura vegetal, obtenida mediante procesamiento digital de fotografías aéreas de la cubierta vegetal.

## 2. Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló sobre cuatro plantaciones comerciales de lechuga variedad Little Gem, (*Lactuca sativa* L. cv. 'Little Gem'), durante los años 2011 y 2012, agrupadas en dos temporadas: dos plantaciones en primavera (de abril a junio) en una finca de 20,4 ha localizada en la pedanía de Pozohondo, provincia de Albacete, España; y dos plantaciones en otoño (de octubre a diciembre) en otra finca de 8,3 ha localizada en San Javier, provincia de Murcia, España.

### 2.1 Diseño experimental

Durante los periodos de observación de cada cultivo, en cada finca se delimitaron 4 parcelas de muestreo, representativas del cultivo, y distribuidas aleatoriamente evitando la zona externa de la plantación para eliminar el efecto borde. En cada parcela de muestreo se midió la profundidad radicular del cultivo ( $z$ ), mediante catas realizadas en el terreno; y se llevó a cabo un seguimiento de la fracción de cobertura vegetal ( $F_c$ ) mediante la obtención de fotografías digitales del dosel vegetal; para ello se utilizó una cámara digital compacta (Coolpix S3300, Nikon, Japón) montada sobre un trípode a una altura fija de 1,40

m sobre el terreno. Como valores ( $z$  y  $F_c$ ) de cada día muestreado, se tomó el promedio de las 4 parcelas.

### 2.2 Obtención del parámetro $F_c$

Para determinar la  $F_c$  a partir de cada fotografía del cultivo, las imágenes obtenidas fueron sometidas a un proceso de clasificación supervisada y posterior proceso de segmentación mediante el empleo del software ENVI® (Environment for Visualizing Images) versión 4.0, desarrollado por Research System Inc. (Boulder, CO, USA) (Fig. 1). Se trata de un moderno sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multispectral de datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites. Además, ENVI® proporciona un entorno potente y de fácil uso para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas con su procesamiento de imágenes, basado en ficheros y bandas.

En el procesamiento digital mediante el software ENVI® de las imágenes de la cubierta vegetal obtenidas en cada una de las parcelas muestreadas, se definieron dos categorías en cada imagen: suelo (beige) y vegetación (verde) (Fig. 1). Para asignar a cada pixel de la imagen su pertenencia o no a las dos categorías definidas (suelo o vegetación) fue necesario asignar estas categorías a cada color de la imagen. De esta forma el resultado final es el número de píxeles correspondientes a vegetación, suelo y totalidad de la imagen. El parámetro  $F_c$  fue obtenido en cada imagen como cociente entre el número de píxeles de color verde y número de píxeles totales.

### 2.3 Ajuste del modelo

Los valores de  $z$  y  $F_c$  registrados durante las plantaciones correspondientes al año 2011, se ajustaron mediante un análisis de regresión no lineal. Para ello se analizaron varias funciones de aproximación, incluyendo el modelo logarítmico, monomolecular, logístico y Gompertz.

El ajuste entre ambos parámetros se llevó a cabo utilizando la herramienta SOLVER de Microsoft Excel, que permite resolver problemas de optimización lineal y no lineal, pudiéndose incluir restricciones enteras sobre las variables de decisión. Como estadígrafo de comparación se utilizó el error cuadrático medio (ECM) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se seleccionó como solución óptima aquella que proporcionó el mínimo ECM y máximo  $R^2$ .

Las ecuaciones matemáticas obtenidas en el modelo fueron aplicadas posteriormente en las

plantaciones de 2012 para comprobar la bondad del ajuste.

0,830 cm, valores muy similares a los obtenidos en la plantaciones de 2011.

### 3. Resultados y Discusión

El seguimiento de las plantaciones de 2011 permitió obtener la evolución de los parámetros profundidad radicular ( $z$ ) y fracción de cobertura vegetal ( $F_c$ ) (Fig. 2). Se puede comprobar que ambos parámetros describen una curva de crecimiento muy similar, lo que evidencia una buena correlación entre ambas componentes del crecimiento del cultivo. Esto permite definir una función de estimación de la profundidad radicular a partir de los datos de fracción de cobertura.

En la plantación de primavera de 2011, los mejores resultados fueron obtenidos utilizando el modelo logarítmico de aproximación (Fig. 3). Para evaluar el comportamiento de la ecuación obtenida se realizó un análisis de regresión entre los valores de profundidad radicular medidos y estimados obteniendo una pendiente de la recta de regresión muy similar a la unidad (0,981), un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,981$  cm y un ECM = 0,649 cm.

Por otra parte, para el caso de la plantación de otoño de 2011, el mejor ajuste entre  $z$  y  $F_c$  se logró utilizando el modelo logístico (Fig. 4). En este caso, el ajuste realizado reportó un análisis de regresión muy similar al realizado para el caso de la plantación de primavera de 2011, una pendiente de la recta de regresión muy similar a 1 (0,994), un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,993$  y un ECM = 0,666 cm.

Según lo expuesto, se evidencia que la metodología presenta una fuerte componente de estacionalidad, que condiciona el tipo de función de aproximación. Mientras en la plantación llevada a cabo en primavera, el modelo logarítmico es el que comporta mejor ajuste entre las variables fracción de cobertura vegetal y profundidad radicular, no ocurre lo mismo en la plantación de otoño, en el que el modelo logístico es el que mejor relaciona ambas variables.

Para demostrar la validez de la metodología desarrollada, las ecuaciones obtenidas durante las plantaciones de 2011 fueron aplicadas en condiciones similares durante las plantaciones de 2012 (Figs. 3 y 4). El análisis de regresión lineal llevado a cabo en ambos cultivos reportó una pendiente de recta de regresión lineal muy similar a 1 (1,002 y 0,935, respectivamente para primavera y otoño) y un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,987 y 0,999, respectivamente. En ambos casos, el ECM fue de 0,536 cm y

### 4. Conclusiones

Este artículo desarrolla una nueva metodología para la estimación de la profundidad radicular de un cultivo de lechuga variedad 'Little Gem', basada en técnicas de fotografía digital. El parámetro  $F_c$  fue obtenido mediante el procesamiento informático de fotografías digitales de la cubierta vegetal, y posteriormente relacionado con la profundidad radicular ( $z$ ) mediante diversas funciones de aproximación.

En la plantación de primavera, se logró obtener una ecuación de tipo logarítmico para modelizar la relación entre ambos parámetros ( $F_c$  y  $z$ ). La aplicación de dicha ecuación en el siguiente año, reportó una excelente bondad del ajuste ( $R^2 = 0,987$ ). En el caso de la plantación de otoño, la ecuación obtenida fue de tipo logístico y su aplicación en 2012 también reportó un excelente ajuste ( $R^2 = 0,999$ ), demostrando la validez de la metodología.

Los resultados obtenidos demuestran la fuerte relación existente entre  $F_c$  y  $z$ . Se trata pues, de una metodología basada en dicha relación, pero con una fuerte componente estacional que condiciona el tipo de ecuación que se obtiene, dependiendo de la temporada del ciclo de cultivo.

La metodología propuesta permite desarrollar algoritmos más precisos para riego inteligente, al tratarse de una herramienta analítica de aplicación en sistemas automáticos de riego que proporciona una optimización del beneficio económico del cultivo de lechuga atendiendo al agua consumida, pues el conocimiento de la profundidad radicular en cada momento del desarrollo del cultivo, permite ajustar las prácticas de gestión del riego para mantener condiciones óptimas de humedad únicamente la zona radicular del cultivo.

### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Séneca de la Región de Murcia la financiación de este trabajo de investigación mediante los proyectos 8729/PI/08 y 08754/PI/08.

### 6. Referencias bibliográficas

[1] Carvajal, F., Agüera, F., Sánchez-Hermosilla, J. 2014. Water balance in artificial on-farm agricultural water reservoirs for the irrigation of intensive greenhouse crops. *Agr. Water Manage.* 131: 146-155.

[2] Lafond, J. A., Éliane, B. P., Caron, J., Guillaume, T. R. 2014. Evaluating fluxes in Histosols for water management in lettuce: A comparison of mass balance, evapotranspiration and lysimeter methods. *Agr. Water Manage.* 135: 73-83.

[3] Ma, Y., Feng, S., Song, X. 2013. A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain. *Agr. Water Manage.* 127: 13-24.

[4] Taylor, H., Brar, G. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil Till. Res.* 19: 111-119.

[5] Calera, A., Martínez, C., Meliá, J. 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sens.* 22: 3357-3362.

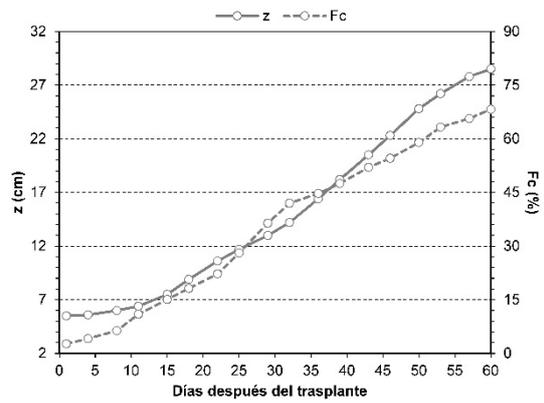
[6] Fernández-Pacheco, D. G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J., Molina-Martínez, J. M. 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosyst. Eng.* 117: 23-34.

[7] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO. *Irrig. Drain. Paper* 56.

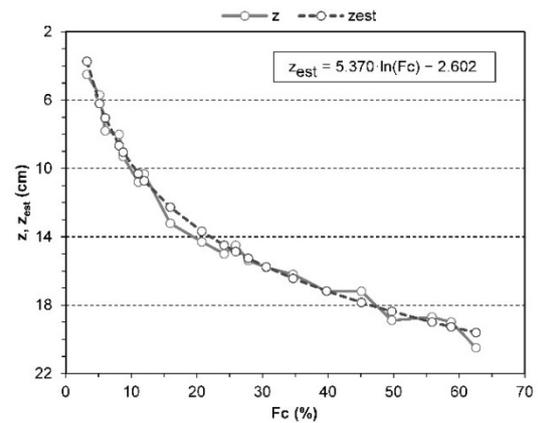
**Tablas y Figuras**



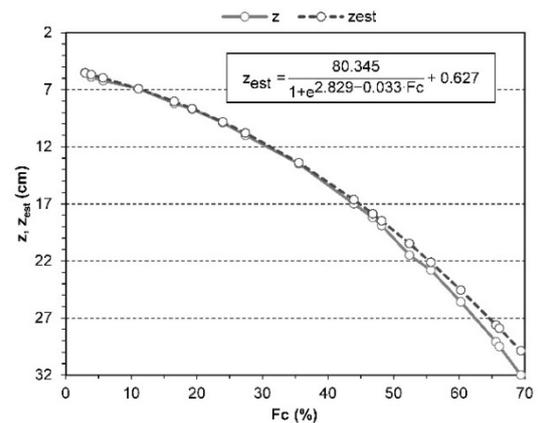
**Figura 1.** Ejemplo de imagen digital del cultivo y su correspondiente bicolor segmentada con el software ENVI® de tratamiento de imágenes.



**Figura 2.** Evolución de la fracción de cobertura vegetal (Fc) y profundidad radicular (z) durante el ciclo de otoño 2011.



**Figura 3.** Relación entre fracción de cobertura vegetal (Fc) y profundidad radicular (z) para valores reales y estimados de z, obtenidos según ecuación logarítmica. Primavera 2013.



**Figura 4.** Relación entre fracción de cobertura vegetal (Fc) y profundidad radicular (z) para valores reales y estimados de z, obtenidos según ecuación logística. Otoño 2013.