

E-06-2023

Comunicación científico-técnica

Diseño, dimensionado y validación de un sistema de riego por goteo de precisión en cultivos hortícolas

Autores: Morcillo, M.¹; Ballesteros, R.²; Del Castillo, A.³; Sevilla, A.⁴; Moreno, M.A.⁵

1 Filiación, manuel.morcillo@uclm.es

2 Filiación, rocio.ballesteros@uclm.es

3 Filiación, amaro.castillo@uclm.es

4 Filiación, agustin.sevilla@uclm.es

5 Filiación, miguelangel.moreno@uclm.es

Resumen: En un contexto de recursos limitados donde la demanda de alimentos es cada vez mayor, se hace imprescindible el avance hacia una agricultura más sostenible, que permita obtener unas mayores producciones utilizando la menor cantidad de insumos posibles. Para ello, es necesario establecer zonas dentro de una misma parcela, con características diferenciadas, de forma que se permita un manejo particularizado de las mismas. Esto, sumado a la utilización de sistemas de riego de alta eficiencia, como sistemas de riego por goteo, los cuales permiten ser gestionados y automatizados para adaptarse a dichas características diferenciadas, aumentan en gran medida la productividad de los insumos aplicados sin mermar la producción del cultivo.

Por ello, el objetivo perseguido ha sido diseñar, dimensionar y validar un sistema de riego por goteo de dosis variable a partir de la zonificación de una parcela en función de su potencial productivo. En este sistema de riego, la separación entre ramales y entre goteros es la misma, pero en las zonas con menor potencial productivo, el caudal de los emisores instalados es superior (2,0 l/h) que en las zonas con mayor potencial productivo (1,6 l/h), de manera que se intentan corregir esas diferencias a nivel de suelo aplicando una dosis de agua de riego diferenciada. Para poder analizar estos resultados, en cada una de las zonas se ha utilizado un sector de riego con un diseño convencional. Este trabajo se ha llevado a cabo en una parcela comercial ubicada en Tarazona de la Mancha (Albacete) con un cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).

Mediante el innovador sistema de riego por goteo de dosis variable desarrollado se ha determinado que se pueden paliar las diferencias de producción debidas a otros factores, consiguiendo homogeneizar las producciones dentro de la parcela. Así, se han mejorado los rendimientos sin aplicar una mayor cantidad de agua a lo largo de toda la parcela como se hace en los sistemas de riego convencionales, sino solamente en las zonas menos productivas que lo necesiten. Por el contrario, en la zona menos productiva con goteros de 2,0 l/h y su zona testigo con goteros de 1,6 l/h, se han obtenido diferencias significativas en cuanto a producción.

Palabras clave: Riego; Goteo; Precisión; Dosis variable.

Design, sizing and validation of a precision drip irrigation system in horticultural crops

Authors: Morcillo, M.¹; Ballesteros, R.²; Del Castillo, A.³; Sevilla, A.⁴; Moreno, M.A.⁵

1 Affiliation, manuel.morcillo@uclm.es

2 Affiliation, rocio.ballesteros@uclm.es

3 Affiliation, amaro.castillo@uclm.es

4 Affiliation, agustin.sevilla@uclm.es

5 Affiliation, miguelangel.moreno@uclm.es

Abstract: In a context of limited resources where the demand for food is increasing, it is essential to move towards a more sustainable agriculture, which allows obtaining higher productions using the least amount of inputs possible. For this, it is necessary to establish zones within the same plot, with differentiated characteristics, so that a particularized management of them is allowed. This, added to the use of high-efficiency irrigation systems, such as drip irrigation systems, which can be managed and automated to adapt to these differentiated characteristics, greatly increase the productivity of the inputs applied without reducing the production of the soil. crop.

For this reason, the objective pursued has been to design, size and validate a variable dose drip irrigation system based on the zoning of a plot based on its productive potential. In this irrigation system, the separation between branches and between drippers is the same, but in areas with less productive potential, the flow rate of the installed emitters is higher (2.0 l/h) than in areas with higher productive potential. (1.6 l/h), so an attempt is made to correct these differences at ground level by applying a differentiated dose of irrigation water. In order to analyze these results, an irrigation sector with a conventional design has been used in each of the zones. This work has been carried out in a commercial plot located in Tarazona de la Mancha (Albacete) with a broccoli crop (*Brassica oleracea var. italica*).

Through the innovative variable rate irrigation system (VRI) developed, it has been determined that differences in production due to other factors can be alleviated, managing to homogenize production within the plot. Thus, yields have been improved without applying a greater amount of water throughout the entire plot as is done in conventional irrigation systems, if not only in the less productive areas that need it. On the contrary, in the least productive area with drippers of 2.0 l/h and its control area with drippers of 1.6 l/h, significant differences have been obtained in terms of production.

Palabras clave: Irrigation; Drip; Precision; VRI.

1. Introducción

La producción de alimentos y el uso del agua están relacionados de forma inseparable. El agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo. Con la competencia cada vez mayor por recursos hídricos no renovables en todo el mundo y la creciente demanda de productos agrícolas, nunca ha sido tan apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua para la producción de cultivos. Con la creciente escasez de agua, el deterioro de la calidad de los recursos hídricos y las incertidumbres del cambio climático, mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en los cultivos, al tiempo que se reduce el impacto negativo sobre el medio ambiente, es de suma importancia para responder a la creciente demanda de alimentos de la población mundial en aumento [1].

En este contexto, nace la necesidad de realizar una mejor gestión dentro de las propias explotaciones de forma individual, entendiendo que dentro de una misma parcela pueden existir distintas zonas en la que el cultivo se desarrolla de manera desigual, y que, por tanto, las necesidades de insumos son cambiantes para cada una de ellas. Por ello, es necesario establecer zonas dentro de una misma parcela, utilizando criterios que permitan realizar dicha caracterización, de forma que se permita un manejo particularizado de las mismas. Varios autores han desarrollado sistemas de riego de precisión que son capaces de realizar una aplicación de agua diferenciada en base a zonificaciones previas. En laterales de avance frontal, se incorporan sistemas de posicionamiento que permiten localizar las distintas zonas de aplicación, de manera que para cada una de ellas el equipo es capaz de controlar la apertura y cierre de aspersores, así como la velocidad de avance del equipo, permitiendo un riego diferenciado [2]. En sistemas pívot, se han desarrollado equipos que permiten ayudar en la toma de decisiones y realizar un manejo autónomo para las diferentes zonas intraparcelsarias, esto se realiza integrando una combinación de datos predefinidos por el usuario, estaciones climáticas y la utilización de distintos sensores [3]. Sin embargo, en sistemas de riego por goteo, no se han encontrado referencias de otros autores que hayan desarrollado un sistema de dosis variable. Además, este tipo de sistemas cuenta con la ventaja de tener una alta eficiencia y permiten ser gestionados y automatizados para adaptarse a dichas características diferenciadas, permitiendo en este sentido aumentar la productividad de los insumos aplicados sin mermar la producción del cultivo.

Así, el objetivo de este trabajo es el diseño, dimensionado y validación de un sistema de riego por goteo de dosis variable que permita homogeneizar la producción de un cultivo hortícola mediante la aplicación de agua de riego diferenciada en función del potencial productivo del suelo, aplicando una mayor cantidad de agua de riego a las zonas menos productivas.

2. Materiales y métodos (Trabajo de innovación: descripción de la innovación)

2.1 El caso de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en una parcela comercial ubicada en el término municipal de Tarazona de la Mancha (Albacete), tiene una superficie de 1,84 ha y al inicio del estudio no contaba con sistema de riego. Sin embargo, la parcela poseía una toma de riego de la comunidad de regantes SAT Soreta. Dentro de la explotación se encontraban dos zonas de diferencias, una productiva la cual se cultivaba en secano y otra destinada para pastos, la cual no se había cultivado anteriormente (Figura 1).

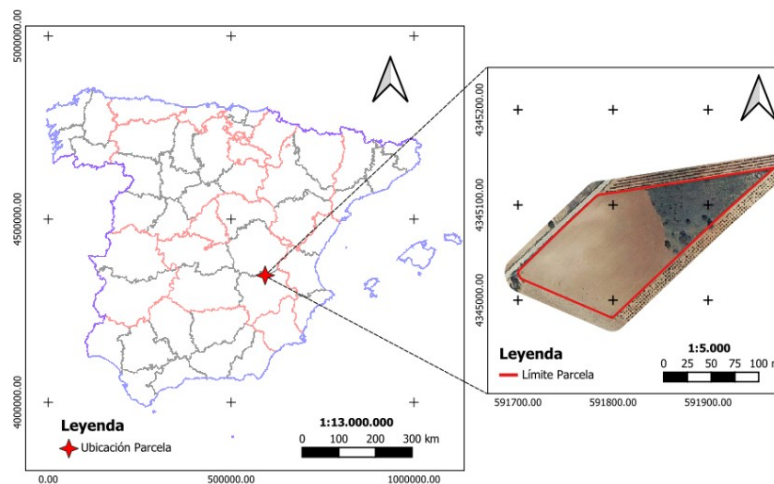


Figura 1. Localización de la parcela de estudio.

Para la realización de este estudio se decidió implantar un cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *parthenon*), el cual se regaría mediante riego por goteo. Puesto a que se trata de una parcela comercial con intereses económicos, se utilizó toda la superficie disponible, realizando previamente las labores de preparación del terreno para ambas zonas.

2.2 Zonificación

En el año 2021 la parcela se cultivó de cebadal (*Hordeum vulgare*) en secano. Debido a que no se realizaron riegos, el manejo (labores, abonado y tratamientos fitosanitarios) fue homogéneo y la extensión de la parcela no es lo suficientemente grande como para observar diferentes condiciones climáticas dentro de la misma, se estima que las posibles variaciones en el desarrollo del cultivo y por tanto en su producción final, vienen dadas por el potencial productivo del suelo. Para determinar si existían estas diferencias intraparcclarias se utilizó el cultivo como sensor. Así, se usaron imágenes de satélite Sentinel 2 para estudiar el desarrollo del cultivo (debido a que permite disponer de una amplia serie temporal), procesando y obteniendo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para todas las imágenes captadas de la parcela durante el ciclo de cultivo del cereal. Tras este proceso, se seleccionó la imagen del día 18/04/2021, donde cultivo había alcanzado su máximo grado de cobertura vegetal (GCV), realizando sobre todos los píxeles de 10x10m pertenecientes a la zona cultivada un proceso de clusterización K-medias y krigeado (figura 2), obteniendo así dos zonas diferenciadas para la parte de la parcela cultivada.

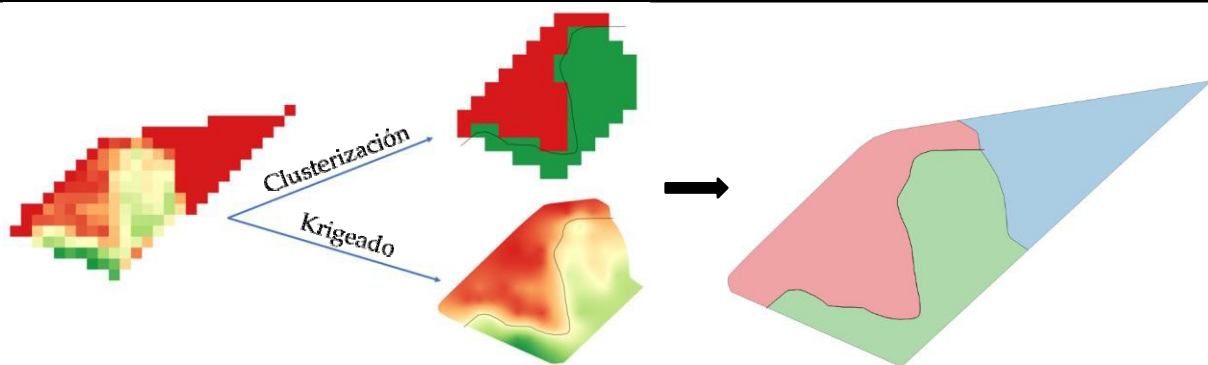


Figura 2. Clusterización y krigeado de la imagen de Sentinel 2 (izquierda) y zonificación final (derecha).

A la derecha de la figura 2 se muestran las distintas zonas de la parcela, donde se encuentra la zona menos productiva (rojo), la zona más productiva (verde) y la zona sin datos iniciales (azul). Para cada una de estas zonas se realizó un análisis de suelo con muestreo en zig-zag, con el objetivo de determinar las características de cada una de ellas.

2.3 Diseño y dimensionamiento del sistema de riego

Debido a que el sistema de riego a diseñar y dimensionar se planteó con una larga vida útil, se buscó un marco de plantación del cultivo de brócoli que fuese compatible con otro tipo de cultivos, para así poder utilizarse en posteriores campañas. Estableciendo así un marco de plantación de 0.3x0.7m. Una vez determinada la distancia entre goteros (0.3 m) y entre ramales (0.7 m), se seleccionó como tubería emisora el modelo AZUD PREMIER PC de 16 mm de diámetro, 0.9 mm de espesor y goteros autocompensantes integrados de 1.6 l/h. Para cumplir los objetivos del trabajo y aplicar una mayor cantidad de agua a las zonas con menor potencial productivo, se utilizó en esta zona el mismo modelo de tubería pero con el caudal de gotero inmediatamente superior, en este caso de 2 l/h. Establecidos los modelos de tuberías, se realizó el diseño del sistema de riego completo en el software de diseño asistido por computadora AutoCAD, siguiendo criterios recomendados por el fabricante y dimensionando los sectores y subsectores en función del caudal del hidrante. El archivo dwg (DraWinG) resultante se integró junto al Modelo Digital del Terreno (MDT) con paso de malla de 2 m descargado del Centro de Descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) en un programa creado en entorno MATLAB, el cual permite obtener el diseño del sistema de riego en un archivo capaz de ser leído por el software de simulación hidráulica EPANET, asignando diferentes características a cada una de las tuberías en base al color introducido en AUTOCAD y utilizando el MDT para ubicar en altura cada uno de los elementos. Con el programa EPANET se realizó un proceso iterativo de simulaciones del sistema de riego en el que se realizaban modificaciones en el diámetro de todas las tuberías principales, secundarias y terciarias hasta conseguir una correcta distribución de presiones y de velocidad de agua dentro de las tuberías. Además, con estas simulaciones y al utilizar goteros autocompensantes, se realizó un ajuste en la presión del hidrante para que el que el gotero más desfavorable de la instalación se encontrara en el límite inferior de su rango de autocompensación (0.6 bar). De esta forma, la presión utilizada es óptima para regar de la forma más eficiente posible, permitiendo realizar un ahorro energético.

El sistema de riego resultante se compone de dos sectores, estos sectores a su vez cortan la zonificación definida por potencial productivo, obteniendo así nuevas zonas (figura 3).

A la izquierda de la figura 3 se muestran las diferentes zonas que conforman la parcela. Por un lado se encuentran zonas Z1 y Z3.1 con un menor potencial productivo (azul), por otro lado se encuentran las zonas Z2 y Z3.2 con un mayor potencial productivo (verde) y por último la zona Z4, sin datos iniciales. A la derecha de la figura 3 se muestran las zonas por dosis de riego, donde, por un lado se encuentra la zona Z1 con un caudal de goteros de 2.0 l/h (azul) y, por otro lado se encuentran el resto de zonas con un caudal de 1.6 l/h (verde).

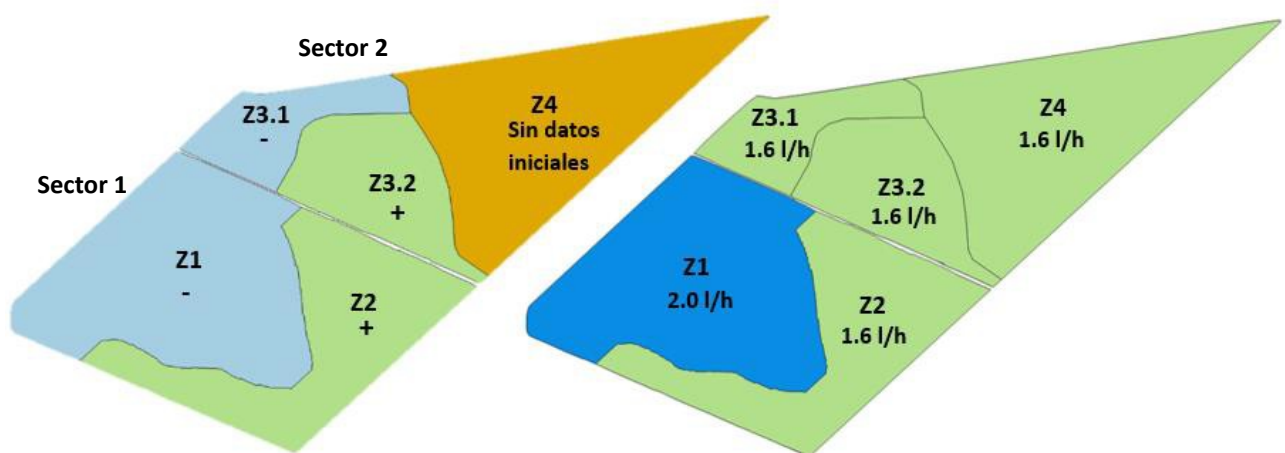


Figura 3. Zonas por productividad (Izquierda), zonas por dosis de riego (derecha).

Con el objetivo de poder comparar datos de producción, se han utilizado las zonas Z3.1 y Z3.2 como zonas testigo. Por ello, a la zona Z3.1, a pesar de tener un menor potencial productivo, se han instalado goteros de menor caudal (1.6 l/h). Sin embargo, en la zona Z3.2 al tener un mayor potencial productivo se han mantenido los goteros de menor caudal.

2.4 Instalación y manejo del cultivo

Tras el diseño y dimensionamiento del sistema de riego, se procedió a la preparación del terreno y su instalación. Puesto que parte del sistema de riego está destinado para poder montarse y desmontarse tras cada campaña, la red de tuberías principales se instaló de forma fija, en PVC y enterrada, mientras que las tuberías secundarias, terciarias y los ramales portagoteros (parte desmontable) se instalaron de forma superficial y en polietileno, con el objetivo de poder ser atravesadas por la maquinaria agrícola para poder realizar los diferentes tratamientos y labores. Para la correcta ubicación de todos los elementos que componen el sistema de riego se utilizó un GNSS-RTK Leica Zeno 20, mientras que para la instalación de los ramales portagoteros se realizaron surcos utilizando un tractor con sistema GNSS equipado con un cultivador, de forma que en la parte interior de los surcos se colocaron los ramales y en la parte superior (solamente a un lado) se plantó el brócoli (de forma manual). Debido a que hay ramales en los que por pertenecer a dos zonas diferentes cuentan con tramos de goteros de distinto caudal, se ubicaron cada uno de estos cambios con el equipo Leica Zeno 20 y se realizaron los empalmes de los diferentes tipos de tuberías de forma manual.

El abonado y los tratamientos fitosanitarios fueron realizados por el propietario de la parcela siguiendo las recomendaciones de la comercializadora de la planta de brócoli. No se realizó fertirrigación para evitar aplicar una mayor cantidad de fertilizante a la zona de mayor pluviosidad.

2.5 Manejo del riego

Con el objetivo de no alterar ni influir en los resultados finales de producción, se llevó a cabo un manejo homogéneo del riego en todas las subunidades. La planificación de riegos fue llevada a cabo mediante teledetección de alta resolución con drones, donde semanalmente se realizaba un vuelo con una cámara RGB. Tras su procesamiento y la obtención de una ortoimagen de toda la parcela, se utilizó el programa GEO-LAIC [4] para la obtención del grado de cobertura vegetal del cultivo. Mediante la utilización de las ecuaciones desarrolladas por Johnson and Trout [5], se relacionó el grado de cobertura medio de toda la parcela con el coeficiente de cultivo basal (k_{cb}) y tras la realización del balance hídrico en el suelo con las fórmulas de FAO [6], se obtuvieron las necesidades de agua semanales a aplicar al cultivo. Los datos climáticos utilizados: evapotranspiración de referencia (ET_0) y precipitación efectiva (P_e), fueron obtenidos de estación más cercana del sistema de información agroclimática para el regadío (SIAR), ubicada en el término municipal de Motilleja. La pluviosidad del sistema de riego utilizada para el cálculo fue determinada en función del caudal más bajo aplicado por los goteros (1,6 l/h), con el objetivo de aplicar a las zonas con un menor potencial productivo y que cuentan con goteros de mayor caudal (2 l/h) un aporte extra de agua, buscando obtener ese incremento de rendimiento que permita homogeneizar producciones. Este proceso para determinar las necesidades de riego semanales fue realizado durante todo ciclo de cultivo. Para monitorizar y controlar que los riegos se ajustaban a la profundidad radicular del cultivo, se instalaron sondas de humedad TEROs 10 (METER) en 5 puntos distribuidos en las diferentes zonas de la parcela, colocando en cada uno de estos puntos sondas a 12,5 cm (zona de principal desarrollo radicular donde mantener una humedad adecuada) y a 25 cm (zona límite donde no llegar a un contenido humedad por encima de capacidad de campo, para evitar pérdidas por percolación).

2.6 Monitorización del cultivo y determinación de la producción

El brócoli fue plantado a un marco de 0.3x0.7m, sin embargo, durante la fase de establecimiento del cultivo algunas de las plántulas no consiguieron desarrollarse, variando el número de plantas por unidad de superficie. Por ello y para tener un control exacto del número final de plantas que componen cada una de las zonas, se utilizó el sistema de información geográfica QGIS para realizar un conteo de número de plantas usando una ortoimagen de muy alta resolución obtenida con dron, permitiendo a su vez georreferenciar cada una de las plantas en una capa de puntos en formato shp (shapefile). Para poder trabajar con pequeñas unidades de superficie donde controlar el desarrollo del cultivo (mediante la obtención semanal de imágenes de dron), se creó una malla en toda la parcela con un tamaño de cuadrícula de 1.2x1.4m, realizando una clasificación según el número de plantas que contienen.

Para poder obtener datos de rendimiento, se realizó un muestreo de biomasa unos días antes de la recolección del cultivo. Para ello, se muestrearon cuatro cuadrículas en cada una de las

zonas Z1 y Z2. En el caso de las zonas testigo Z3.1 y Z3.2, al tener una menor superficie, se muestrearon tres cuadrículas para cada una de ellas. Dentro de cada una de las zonas, la selección de las cuadrículas se realizó de manera aleatoria entre aquellas que contaban con un total de 6 plantas de brócoli (marco de plantación completo), con el objetivo de no seleccionar cuadrículas con un inferior número de plantas en la que las condiciones para desarrollarse son más favorables, evitando introducir un factor de error al ensayo.

En la figura 4 se muestra la ubicación de cada una de las cuadrículas de muestreo y el detalle de las plantas que componen uno de los marcos, las cuales, tras ser recolectadas se llevaron a laboratorio y se pesaron en fresco de forma individual, distinguiendo para cada una de ellas las diferentes partes vegetativas: hojas, tallos y pellas. Posteriormente se introdujeron en una estufa para la determinación de su peso en seco.

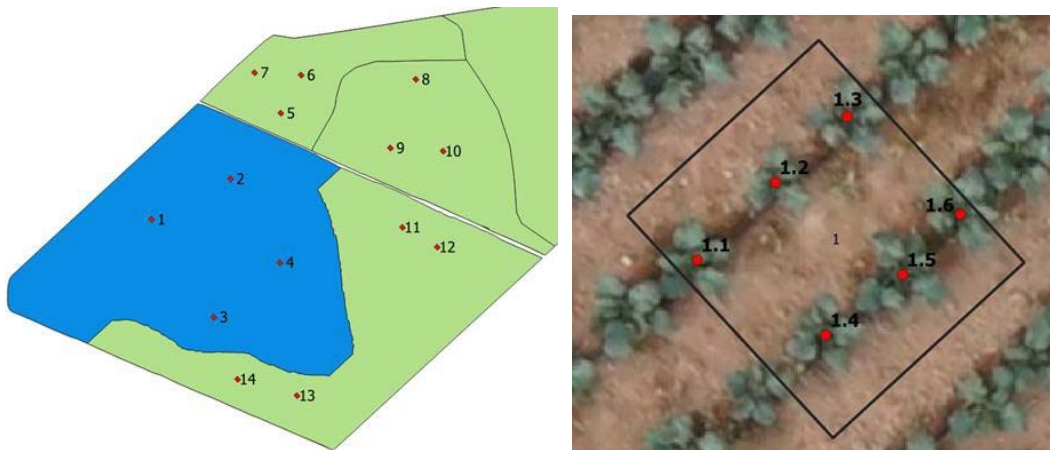


Figura 4. Ubicación de los marcos de muestreo (izquierda) y marco de muestreo ampliado superpuesto al cultivo (derecha).

Con el peso fresco de las pellas de cada una de las plantas de brócoli muestreadas, se ha obtenido un peso medio por unidad para cada una de las zonas. Este peso medio se ha multiplicado por el número de plantas de cada zona con el objetivo de estimar la producción final en cada una de ellas y poder relacionarla con la cantidad de agua aplicada (ya que se conoce el número y caudal de goteros de cada una de las zonas, así como las horas de riego de cada uno de los sectores), permitiendo obtener la productividad del agua de riego.

Por otra parte, con los datos de producción obtenidos se llevó a cabo un análisis estadístico para determinar si existían diferencias significativas entre las diferentes zonas. Así, para cada una las partes vegetativas (hojas, tallos y pellas) y tratando como unidad cada una de las plantas de forma independiente, se realizaron 3 análisis de varianza (ANOVA): entre todas las zonas de la parcela, entre la zona Z1 y su testigo (Z3.1), y entre la zona Z2 y su testigo (Z3.2). Se realizaron los mismos análisis tanto para las muestras en fresco como para las muestras en seco, obteniendo un total de 18 relaciones (3 para las hojas en fresco, 3 para las hojas en seco, 3 para los tallos en fresco, 3 para los tallos en seco, 3 para las pellas en fresco y 3 para las pellas en seco).

3. Resultados y discusión

Tras la realización de un análisis ANOVA de los resultados obtenidos, solamente se obtuvieron diferencias significativas en la producción de pellas entre las zonas Z1 y su testigo (Z3.1), es decir, en la zona Z1 el extra de agua aportado mediante el sistema de riego de dosis variable ha afectado de forma considerable al rendimiento, permitiendo en esa zona homogeneizar las producciones con el resto de la parcela. Por el contrario, en la zona Z3.1, donde el potencial productivo es menor y se ha aplicado la misma cantidad de agua (goteros de 1.6 l/h) que en las zonas más productivas, no se han alcanzado los niveles de producción que en el resto de la parcela. En la figura 5 se muestra un box plot con los pesos en fresco de las pellas de forma individual para cada una de las zonas, donde se puede observar que el peso de las pellas de brócoli es similar en todas las zonas de la parcela, a excepción de la zona Z3.1 que se encuentra por debajo de la media.

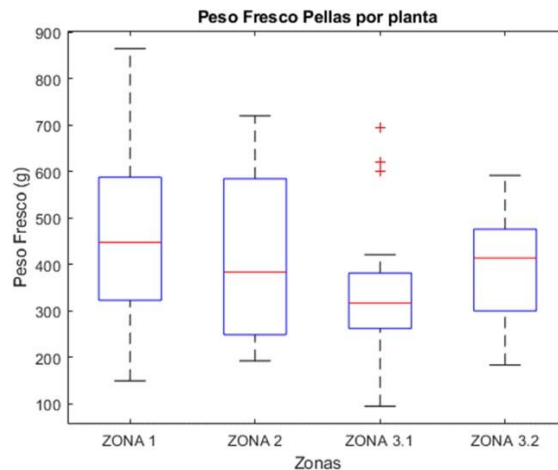


Figura 5. Box plot del peso fresco de las pellas por planta para cada una de las zonas.

Los resultados de rendimientos finales se muestran en la tabla 1, donde se relacionan los datos de producción obtenidos en los muestreos con la cantidad de agua aplicada. Para la zona Z4, en la que no se realizaron muestreos de biomasa, se ha utilizado como peso medio de las pellas el dato promedio de todas las zonas de la parcela, permitiendo así obtener una estimación de la producción en toda la plantación, ya que el resto de parámetros dados por el sistema de riego son conocidos.

Zonas	Nº plantas	Peso medio pellas fresco (kg)	Caudal goteros (l/h)	Pluviosidad (mm/h)	Riego (h)	Agua riego (m3)	Kg pellas/m ³ aplicado
1	18075	0.465	2	7.143	70.917	2570.73	3.278
2	6242	0.409	1.6	5.714	70.917	1007.81	3.605
3.1	4356	0.336	1.6	5.714	71.417	538.65	2.937
3.2	6890	0.403	1.6	5.714	71.417	836.32	3.526
3.3	10315	-	1.6	5.714	71.417	1515.52	-
Total	45878			Promedio		6469.03	3.337

Tabla 1. Datos de cultivo, producción, sistema de riego y agua aplicada en las diferentes zonas.

Para determinar la relación entre el rendimiento por m³ de agua de riego aplicado, se han utilizado los datos medios de los marcos de muestreos de cada zona, siendo el resultado de la siguiente ecuación:

$$\text{Kg pellas fresco} / \text{m}^3 \text{ de agua de riego} = \frac{\text{Peso medio pellas fresco (kg)}}{\text{Pluviosidad } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) \times \text{Tiempo de riego (h)} \times \text{Superficie marco (m}^2\text{)}}$$

No se han realizado los cálculos con el total de la superficie de cada zona ya que, si se considerase el número real de plantas, esta relación se vería alterada. Así, en la tabla 1 se puede observar que en las zonas Z2 y Z3.2 el agua aplicada ha sido la más efectiva para aumentar el rendimiento del cultivo, obtenido los mayores valores de producción por cantidad de agua aplicada. Esto es debido a que al aplicar una menor cantidad de agua que en otras zonas, el tipo de suelo (con el mayor potencial productivo de la parcela) ha permitido aprovechar mejor este recurso. En la zona testigo Z3.1, a pesar de aplicar la misma cantidad de agua que en las zonas Z2 y Z3.2, la productividad del agua ha disminuido por debajo de los 3 kg/m³. Sin embargo, en la zona Z.1, con el mismo potencial productivo que su zona testigo (Z3.1), el incremento en el agua de riego aplicada al utilizar goteros de mayor caudal ha hecho que la productividad del agua no se vea tan afectada, aproximándose a los valores de las zonas Z2 y Z3.

4. Conclusiones

Mediante el innovador sistema de riego por goteo de dosis variable desarrollado, se ha determinado que se pueden paliar las diferencias de producción debidas al potencial productivo del suelo, permitiendo maximizar rendimientos sin aplicar una mayor cantidad de agua a lo largo de toda la parcela, como se haría en un sistema de riego convencional, sino solamente en las zonas menos productivas que lo necesiten.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación al MCIN/AEI, enmarcándose el trabajo dentro del proyecto PID2020-115998RB-C22.

Referencias

1. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. 2012. No.66 505.
2. Daccache, A.; Knox, J.W.; Weatherhead, E.K.; Daneshkhah, A.; Hess, T.M. Implementing precision irrigation in a humid climate - Recent experiences and on-going challenges. *Agricultural Water Management*. 2015. Vol. 147: 135-143.
3. Andrade, M.A.; O'Shaughnessy, S.A.; Evett, S.R. Arspivot, a sensor-based decision support software for variable-rate irrigation center pivot systems: part a. development. *Transactions of the ASABE*. 2020. Vol 63:1521-1533.
4. Córcoles, J.I.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.A. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosyst*. 2012. Vol 115: 31-42.
5. Johnson, L.F.; Trout, T.J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in california's san Joaquin Valley. *Remote Sens*. 2012. Vol 4: 439-455.
6. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. Crop yield response to water. *FAO Irrig. Drain*. 2012. Pap. No.66 505.