

EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA APLICACIÓN DE AGUA EN LA ZONA NO SATURADA EN EL CULTIVO DEL PLÁTANO

Axel Ritter^{1*}, Noel Machín¹ y Carlos M. Regalado¹

1: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)
Dep. Suelos y Riegos
Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife
e-mail: aritter@icia.es, web: <http://www.icia.es/gh>

Palabras clave: Contenido de humedad de suelo, instrumentación, programación de riegos, suelos volcánicos.

RESUMEN. *La producción de plátanos en Canarias representa el cultivo de mayor demanda hídrica en el Archipiélago, por lo que el desarrollo de estrategias para el uso eficiente y sostenible del agua aplicada a la zona no saturada tiene un interés creciente. A pesar de los avances en la introducción de sistemas de riego a presión, la incorporación de tecnología que permita el uso racional del agua en explotaciones agrícolas de producción intensiva es aún escasa. En este trabajo se evalúan distintos sistemas o estrategias para la programación del riego diseñados con sensores y dispositivos de control en una explotación agrícola representativa de la zona norte de Tenerife (Islas Canarias). Los diversos sistemas están basados en el uso de sensores de humedad de suelo tensiométricos o dieléctricos, así como en la automatización de la duración del riego según las condiciones micrometeorológicas. Para la implementación y la puesta en marcha de estos sistemas se realiza una caracterización previa de las propiedades hidráulicas de la zona no saturada del suelo. En comparación con la programación de riegos tradicional siguiendo un calendario, estos sistemas han demostrado ser eficaces en la reducción de la aplicación de agua en la zona no saturada permitiendo ahorros de agua de al menos un 26% sin afectar significativamente a la producción de plátanos. No obstante, es necesario seguir avanzando en su desarrollo para diseñar sistemas de programación de riego más adecuados, capaces de controlar otros aspectos agronómicos del cultivo como la fertirrigación.*

ABSTRACT. *Banana production in the Canary Islands represents the crop with highest water demand in the Archipelago. Thus, the development of strategies for the efficient and sustainable water application to the vadose zone is of growing interest. Although the introduction of pressurized irrigation systems is becoming widespread, the implementation of technology for the rational use of irrigation water in intensive agricultural production is still limited. We have evaluated different systems for irrigation scheduling, designed with sensors and control devices, on a representative farm in the north of Tenerife (Canary Islands). On the one hand, these systems were based on the use of tensiometric or dielectric soil moisture sensors. On the other hand, irrigation was scheduled based on micrometeorological conditions. Previous to the implementation of these systems, hydraulic properties of the vadose zone were determined. Compared with the traditional irrigation scheduling method according to a timetable, these systems have proven to be effective in reducing the application of water in the vadose zone allowing water savings of at least 26% without significantly affecting the production of bananas. However, further progress is required to develop systems suitable for automatic irrigation scheduling that can control as well other agronomic aspects of the crop such as the fertirrigation.*

1. INTRODUCCIÓN

Las principales zonas agrícolas en Canarias se encuentran en cotas bajas, donde el método más generalizado de cultivo es en terrazas de poco espesor (<0.80 m), sobre la roca basáltica fracturada. Como consecuencia de la ausencia de suelo agrícola en las partes bajas de la islas, estas terrazas se han construido utilizando suelo que en la mayoría de los casos ha sido transportado desde las zonas altas y de medianías, donde predominan los Andisoles y suelos con propiedades ándicas. Estos suelos “sorribados” que se utilizan en las zonas bajas para

cultivos de exportación, presentan textura fina, debido a que las condiciones de humedad y temperatura en las cotas de origen permiten la formación de esta clase de textura. Este tipo de suelos se caracteriza también por tener propiedades físicas particulares: baja densidad aparente, elevada microporosidad y una elevada capacidad de retención de agua. Además, el fuerte desarrollo de la estructura se manifiesta en una elevada conductividad hidráulica en relación con el contenido de fracción textural de arcilla. Teniendo en cuenta las propiedades hidráulicas particulares de estos suelos agrícolas, así como los grandes volúmenes de agua de riego que consume la agricultura de las Islas, existe interés en el diseño de estrategias dirigidas al uso eficiente y sostenible del agua aplicada a la zona no saturada. En concreto en Tenerife, la agricultura representa uno de los principales sectores económicos demandantes de agua, con un consumo hídrico alrededor de $85 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ para una superficie de regadío que abarca el 64.5% del total de áreas cultivadas (SACT, 2004). Esta superficie se corresponde principalmente con los cultivos de plátano y tomate situados por debajo de los 300 m de altitud. La platanera, constituye, con diferencia el cultivo de mayor demanda hídrica y representa el 60% del consumo de agua agrícola insular ($50.75 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$). En cuanto a la eficacia de uso de agua de riego por la platanera, se estima que por cada m^3 de agua consumido, se producen 3.7 kg de plátano y se genera un euro de ingreso (CIAT, 2008). Por otro lado, el coste de agua de riego repercute sensiblemente en los gastos de cultivo, de tal forma que variaciones en el precio de 0.10 euros por m^3 tienen una incidencia del 10% en la productividad del cultivo (CIAT, 2008). Una estrategia recomendada para el manejo adecuado del riego en el cultivo del plátano es el uso de sistemas de riego a presión (por goteo o por aspersión), que permiten ahorros importantes de agua frente al riego por inundación (Rodrigo López y Hernández Abreu, 1985). La utilización de electroválvulas y temporizadores permiten la automatización del riego, sin embargo para establecer cuándo y cuánto regar -programación de riegos- existen varias alternativas dentro de las cuáles algunas son más recomendables que otras. Tradicionalmente la frecuencia y duración de los riegos se establecen según el criterio del agricultor. Por el contrario, en algunas fincas se programa semanalmente la frecuencia y el volumen de riego según la lluvia y las estimaciones de la evapotranspiración potencial de la platanera (método del balance hidrológico). Sin embargo, los métodos recomendados para llevar a cabo una programación de riego adecuada se basan en técnicas que miden, bien el estado hídrico de la zona no saturada, o bien el de la planta (Jones, 2004). Diversos estudios se han realizado en distintos lugares del mundo, y con diversos cultivos, utilizando técnicas para el seguimiento del estado hídrico del suelo y gestión del riego, consiguiendo ahorros de agua y energía, así como la disminución de lixiviados, al mismo tiempo que se mantienen los rendimientos de cultivo (por ejemplo Phene y Howell, 1984; Smajstrla y Koo, 1986; Smajstrla y Locascio, 1996; Marsal et al., 2002; Dukes et al., 2003; Haman, 2002; Muñoz-Carpena et al., 2008).

Los avances en instrumentación para adquisición de datos y control de procesos proporcionan actualmente sistemas de coste asequible y versátiles, ideales para la implementación de estrategias que permitan el uso racional del riego en explotaciones agrícolas de producción intensiva. Los sistemas que dependen del estado hídrico de la zona no saturada, determinan cuándo y cuánto regar en función de las lecturas que realizan uno o varios sensores insertados en el suelo. Entre los diversos sensores disponibles, hay que distinguir entre los que miden el potencial hídrico (por ejemplo los tensiómetros o los sensores de matriz granular) y los que estiman el contenido de agua del suelo (preferentemente TDR, TDT, FD y ADR) (Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez, 2005). Mientras que los primeros indican la energía que las raíces deben emplear para extraer el agua retenida en los poros del suelo, los segundos permiten conocer lo “lleno” que está el suelo y además, expresando el contenido de humedad en términos de profundidad (en mm), esta magnitud puede ser comparada con otras variables hidrológicas como la lluvia, evapotranspiración, riego, etc. (Muñoz-Carpena et al., 2004). Para la programación de riegos, estos sensores se combinan con una unidad de control (que puede ser un dispositivo sencillo o complejo) que debe interpretar las lecturas y accionar el riego cuando el suelo se ha secado hasta un punto crítico a partir del cuál la planta podría tener dificultades para cubrir sus necesidades hídricas.

En este trabajo se ensayan distintas estrategias para la programación del riego en platanera, basadas en sistemas que utilizan novedosos sensores y dispositivos de control. Estos sistemas se comparan con el método de programación tradicional, evaluando los consumos de agua, las producciones obtenidas, así como el coste y los aspectos técnicos o de manejo de cada sistema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Parcelas de ensayo

Durante el periodo comprendido entre junio de 2007 y junio de 2008 se evaluaron los distintos sistemas de programación de riego en una explotación agrícola representativa de la zona norte de la isla de Tenerife, situada en Bajamar, entre las cotas de 55 y 75 m snm. y a una distancia de la costa de 187 m. Se seleccionaron dos parcelas de la finca, cada con una superficie aproximada de 2000 m², y con platanera del cultivar ‘Gruesa Palmera’ procedente de propagación in vitro. Este cultivo se desarrolla bajo invernadero tipo parral alto, con laterales de plástico y cubierta de malla. Las plantas se disponen en 15 filas simples siguiendo un marco de plantación aproximado de 2.5 por 2.4 m. Dentro de cada parcela se crearon tres sectores de riego con líneas de plantas que fueron regadas mediante las diversas estrategias o sistemas de programación de riego. Cada sector consistía en tres filas de plantas, quedando las filas restantes fuera del ensayo. Cada fila se regaba mediante goteo, con dos tuberías laterales que llevan incorporado goteros de largo conducto interlínea de un caudal de 2.5 l/h (Fig. 1a). Con este tipo de riego se forma un bulbo húmedo en la zona radicular (Fig. 1b). La uniformidad de aplicación del sistema de riego se determinó en un 90% mediante el método del ITRC de la Universidad estatal politécnica de California (Burt et al., 1992), adaptado para el estudio de consumos hídricos y eficiencia de regadíos de la isla de Tenerife (SACT, 2004). Para independizar la aplicación de agua en cada sector se modificó el sistema de riego en cada parcela instalando, en la entrada de agua de cada sector, un contador volumétrico totalizador y una electroválvula (en serie con la electroválvula principal de la parcela, que estaba comandada desde el cabezal). El cabezal de riego en la finca no sólo controlaba el agua en las parcelas de ensayo, sino también en otras parcelas no utilizadas en este trabajo. Por lo tanto, los ensayos se realizaron con la limitación de que el riego en cada sector quedaba condicionado a que estuviera abierta la electroválvula principal. Esto se producía una vez al día y de acuerdo con la programación existente en el temporizador del cabezal.

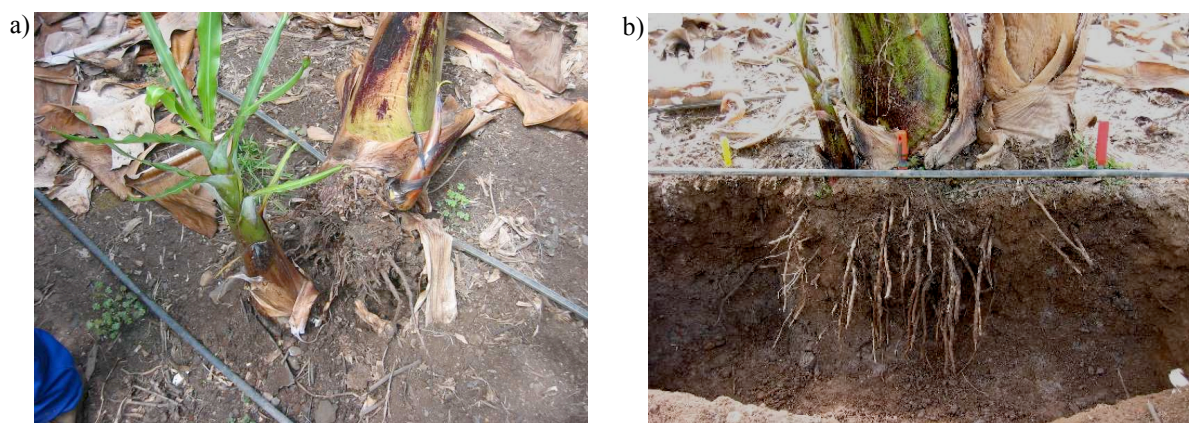


Figura 1. a) Riego por goteo en el cultivo del plátano. b) Sistema radicular de la platanera.

2.2. Sistemas de programación de riego

Atendiendo a criterios como tipo de sensor, su localización y número mínimo necesario, grado de sofisticación, coste y mantenimiento, se diseñaron cuatro sistemas para la programación del riego basados en el estado hídrico del suelo (Tabla 1). Éstos se clasifican en aquellos que usan como variable de decisión el potencial hídrico, Φ (kPa), y los que utilizan el contenido de humedad, θ (m³m⁻³). Por otro lado, teniendo en cuenta la posible heterogeneidad de la zona no saturada, se diseñaron sistemas con diferente número de sensores para medir con mayor o menor representatividad.

Tabla 1. Características de las distintas estrategias o sistemas de programación de riegos ensayados.

Sistema	Criterio	Tipo de Sensor	Número	Dispositivo de control	Número plantas	Inversión
T1	Φ	Tensiómetro	4	Relé-selector	63	415 €
T2	Φ	Tensiómetro electrónico	6	Registrador-Controlador	72	2610 €
V1	θ	Sensor dieléctrico	2	Registrador-Controlador	63	520 €
V2	θ	Sensor dieléctrico	6	Registrador-Controlador	72	1610 €
B	ETp	Micrometeorológicos	-	Temporizador	72	2525 €
C	Agricultor	-	-	Temporizador de riego del cabezal	63	-

Φ : Potencial hídrico (kPa); θ : Contenido de humedad de suelo (%); ETp: Evapotranspiración potencial (mm); Agricultor: Seis riegos por semana a la dosis establecida por el agricultor.

Los sistemas denominados T1 y T2 utilizan tensiómetros de última generación (Irrrometer Company, Inc., Riverside, EEUU), con un diseño especial que asegura la hermeticidad y facilita el manejo. Están provistos de cápsulas de respuesta rápida y de un depósito con capacidad suficiente para rellenar correctamente el tubo del tensiómetro en varios ciclos de riego. Con el Sistema T1, el vacuómetro de cada tensiómetro estaba equipado con un relé-selector que permite fijar un valor crítico de potencial hídrico y activar así una señal para accionar la electroválvula del riego. Los cuatro tensiómetros se instalaron en distintos puntos a la misma profundidad y por parejas, de tal forma que el riego se activaba cuando cualquiera de las dos parejas detectara que el suelo se ha secado lo suficiente como para alcanzar el Φ crítico para la planta. La electroválvula permanecía abierta hasta que el agua aplicada al suelo reestablecía el Φ por debajo del valor crítico. En los tensiómetros electrónicos del Sistema T2, el vacuómetro se ha reemplazado por un transductor de vacío que va conectado a un registrador-controlador Combilog (Theodor Friedrichs & Co., Schenefeld, Alemania). Esto permitía programar el registrador para que de forma automática tomara la lectura de los seis tensiómetros y de acuerdo con el promedio de éstas se activara/desactivara la electroválvula del riego manteniendo así el estado hídrico del suelo dentro del margen deseado.

Con los Sistemas V1 y V2 se aplicaba el riego en función del contenido de humedad del suelo, θ . Se utilizaron sensores dieléctricos EC-5 (Decagon Devices, Inc., Pullman, EEUU) que estiman el volumen de agua como porcentaje de volumen de suelo. Se trata de sensores FD (Frequency Domain) de tipo capacitancia, que han sido mejorados con respecto a sus precursores para medir con mayor precisión, reduciendo la susceptibilidad de sus lecturas a la salinidad y al tipo de textura. Esta clase de sensores resulta atractivo por su bajo coste, su fácil manejo, escaso mantenimiento y por su flexibilidad para ser utilizados con cualquier registrador de datos. El Sistema V1 consiste en la conexión de dos sondas EC-5 a un registrador-controlador GP1 (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Reino Unido) específicamente diseñado para la programación de riegos. Se trata de un dispositivo de bajo coste, versátil y de programación simplificada orientada a usuarios. El Sistema V2, utiliza seis sondas EC-5, conectadas a un registrador-controlador Combilog programado para tomar automáticamente las lecturas de los seis sensores y activar/desactivar la electroválvula del sector de riego correspondiente en función del promedio de los valores de θ .

En cada sector, los sensores dieléctricos y los tensiómetros se instalaron verticalmente a 25 cm de profundidad, en distintos lugares junto a las plantas y bajo la influencia de algún gotero. De acuerdo con Álvarez de la Peña (1981), se recomienda regar la platanera cuando las lecturas de los tensiómetros superen valores de 10-15 kPa. En este ensayo se estableció como criterio para la apertura de electroválvulas 10 kPa y para el cierre 4 kPa. Teniendo en cuenta la profundidad a la que se instalaron los tensiómetros y de acuerdo con la curva de retención de humedad del suelo, estos valores se corresponden con 57% y 61% de contenido de humedad, respectivamente. Para determinar la curvas de retención de humedad se utilizó un pF-Apparatus (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, www.ugt-online.de) con muestras inalteradas en anillos de 7.5 cm de alto por 7.1 cm de diámetro. Este aparato utiliza una balanza y dos mini-tensiómetros electrónicos por muestra para determinar de forma automática el contenido de humedad y la succión de las muestras de suelo a medida que éstas se van secando.

Para obtener la relación específica entre la señal de las sensores dieléctricos EC-5 y el contenido de humedad de este suelo de origen volcánico, se insertó una de estas sondas en una muestra inalterada cilíndrica de 7.5 cm de alto por 7.1 cm de diámetro. El procedimiento de calibración consistió en saturar de agua la muestra de suelo y secarla progresivamente (primero al aire y luego forzando el secado en estufa) tomando lecturas del peso de la muestra y de la señal que proporciona el sensor. La relación entre θ , determinado por gravimetría, y la señal del sensor se obtuvo de forma empírica ajustando la ecuación correspondiente a los datos medidos.

El quinto sistema de programación de riego está basado en el método del balance hidrológico (considerando la evapotranspiración y despreciando la lluvia y la escorrentía). En este sector la duración del riego se automatizó según las condiciones ambientales (Sistema B). Para ello se instalaron sensores micrometeorológicos en el interior del invernadero y se ajustó semanalmente el volumen de riego para satisfacer el 75% de la evapotranspiración potencial de la platanera, calculada según el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y los coeficientes de cultivo publicados en www.icia.es.

Para evaluar estos sistemas de programación de riego, éstos se comparan con la alternativa de riego que consistió en regar según el criterio del agricultor tal y como se ha venido realizando en la finca, siguiendo un calendario y las dosis establecidos según la época del año (Sistema C).

Durante el periodo de ensayo se registró periódicamente el volumen de agua de riego consumido en cada sector y durante la cosecha de plátanos, se realizó el seguimiento de la producción seleccionando plantas de cada sector y pesando las piñas en el momento de corte. Posteriormente, a los pesos brutos de las piñas de plátano se les descontó el peso del raquis para determinar el peso neto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La curva característica de suelo, así como la relación resultante entre θ y la señal del sensor EC-5 (en milivoltios) se ilustran en la Fig. 2. Los puntos representados en la Fig. 2a corresponden a los valores obtenidos en nueve muestras inalteradas de suelo, mientras que la línea continua describe la curva de retención de humedad según la ecuación de van Genuchten (van Genuchten, 1980).

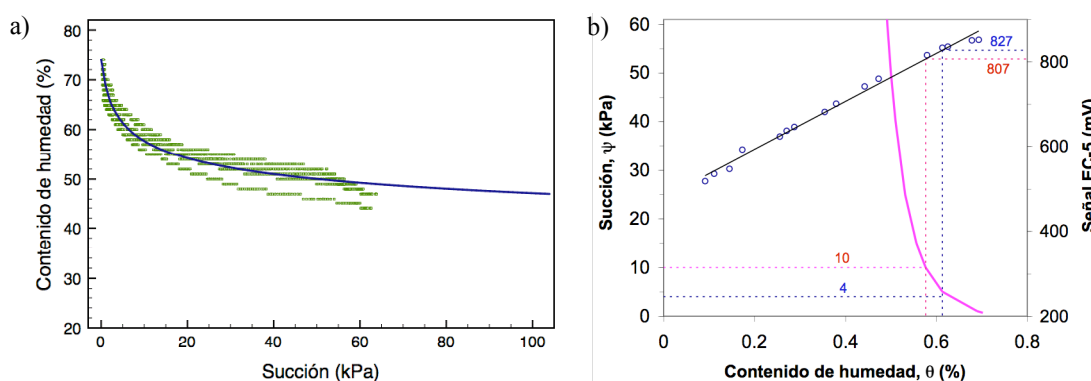


Figura 2. a) Curvas de retención de humedad ajustadas al modelo de van Genuchten. b) Combinación de la ecuación de van Genuchten ajustada, con la ecuación de calibración de la sonda EC-5 para determinar los puntos críticos de estado hídrico del suelo con los sistemas V1 y V2.

En la Fig. 2b se ilustra cómo, combinando el modelo ajustado de van Genuchten con la ecuación de calibración del sensor EC-5, se obtiene que los puntos críticos establecidos en 4 kPa y 10 kPa, se corresponden con contenidos de humedad de suelo de 61% y 57%, respectivamente, y éstos con señales del sensor de 827 mV y 807 mV, respectivamente.

Con relación al volumen de agua consumido en cada sector, los resultados indican diferencias en la demanda hídrica anual (Tabla 2). Mientras que el agricultor tuvo un consumo aproximado de 6500 m³/ha siguiendo un calendario de riegos, las otras estrategias experimentadas muestran consumos inferiores. Así, con la programación de riegos por balance hidrológico (estrategia B), se redujo esta cantidad en un 26%, mientras que con los sistemas diseñados para el control del riego según el estado hídrico del suelo (estrategias T1, T2, V1 y V2), los consumos se redujeron entre un 45% y un 54%.

Considerando un coste promedio del agua de 0.40 €/m³, el ahorro económico supone 0.41 €/pl con la estrategia B y entre 0.70 y 0.85 €/pl con los sistemas diseñados para el control del riego. Expresando estos resultados en consumo de agua por planta (pl) y riego, y distinguiendo entre periodos de mayor y menor demanda hídrica (Fig. 3), se observan diferencias significativas (test Tukey-HSD) entre los 17.3 L pl⁻¹ riego⁻¹ siguiendo un calendario

(estrategia C) frente a los 12.5 L pl⁻¹ riego⁻¹ de la estrategia B durante primavera-verano (Fig. 3a). Resultados similares se obtienen durante el periodo otoño-invierno (15.9 versus 12.2 L pl⁻¹ riego⁻¹, Fig. 3b). Por otro lado, las estrategias de control de riego usando tensiómetros o sensores dieléctricos de humedad de suelo, muestran consumos inferiores (7.3–11.6 L pl⁻¹ riego⁻¹, Fig. 3) significativamente diferentes a los anteriores (test Tukey-HSD). Mientras que para el periodo primavera-verano se observan diferencias significativas entre sí (Fig. 3a), durante el otoño-invierno las cuatro estrategias se comportan de forma similar.

Tabla 2. Consumos de agua de las estrategias de programación de riego ensayadas.

	Estrategia					
	T1	T2	V1	V2	B	C
Consumo total de agua (m ³ /ha)	3482	3142	3005	3577	4823	6541
Ahorro de agua (m ³ /ha)	3059	3399	3535	2964	1718	
Ahorro consumo de agua (%) ^a	47%	52%	54%	45%	26%	
Ahorro gasto agua (€/pl) ^b	0.73	0.82	0.85	0.71	0.41	
Consumo hídrico (L pl ⁻¹ riego ⁻¹)	9.3	8.1	7.5	10.0	12.4	16.7
Consumo hídrico (L pl ⁻¹ día ⁻¹)	5.7	5.1	4.9	5.9	7.9	10.7

^{a)} Porcentaje calculado con respecto a la programación de riego tradicional (estrategia C). ^{b)} Precio de agua estimado en 0,40 €/m³.

Con el objetivo de comparar estos consumos hídricos con las recomendaciones de riego obtenidas de www.icia.es y www.agrocabildo.com para el mismo periodo, el consumo total puede distribuirse entre los días que duró el ensayo, obteniendo valores de 5–11 L pl⁻¹ día⁻¹ (Tabla 2). La suma de las dosis (L m⁻²) recomendadas durante las 52 semanas y repartidas entre el periodo y la densidad de plantas del ensayo, para el caso del ICIA y Agrocabildo, ascienden a 14 y 13 L pl⁻¹ día⁻¹, respectivamente. Estos datos contrastan con el valor de 18.8 L pl⁻¹ día⁻¹ representativo para la isla de Tenerife que se deriva de los datos del SACT (2004) y la misma densidad de plantas de este ensayo.

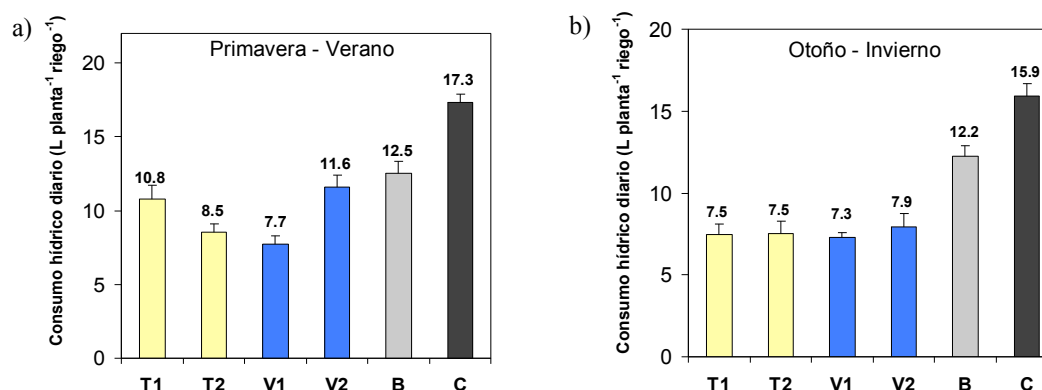


Figura 3. Consumo de agua promedio (con barras de error estándar) obtenido con las diferentes estrategias de programación de riego ensayadas: a) primavera-verano y b) otoño-invierno.

Con respecto de la producción obtenida con cada estrategia (Tabla 3), se determinaron los pesos netos de más del 60% de las piñas (tamaño de muestra suficiente para asumir estadísticamente un error de $\pm 5\%$). En general, el peso neto promedio de las piñas osciló entre los 40 y 48 kg, correspondiendo el valor máximo a la programación de riego por balance hidrológico (estrategia B) (Fig. 4 y Tabla 3).

Tabla 3. Producción de plátanos en las estrategias de programación de riego ensayadas.

	Estrategia					
	T1	T2	V1	V2	B	C
Porcentaje de piñas recolectadas	70%	76%	63%	69%	76%	62%
Peso neto promedio (kg/piña) ^a	44.1	42.0	40.2	42.2	48.3	47.1
Producción (t/ha)	74	70	67	71	82	80
Diferencia en la producción (kg/piña) ^b	-3.0	-5.1	-6.9	-4.9	1.2	-

^{a)} Peso neto calculado como peso de la piña menos el peso del raquis desechado después del empaquetado de la fruta. En general, el peso promedio de los raquis con respecto al peso de la piña fue de 5,8 \pm 1,2%. ^{b)} Calculado con respecto a la programación de riego tradicional (estrategia C).

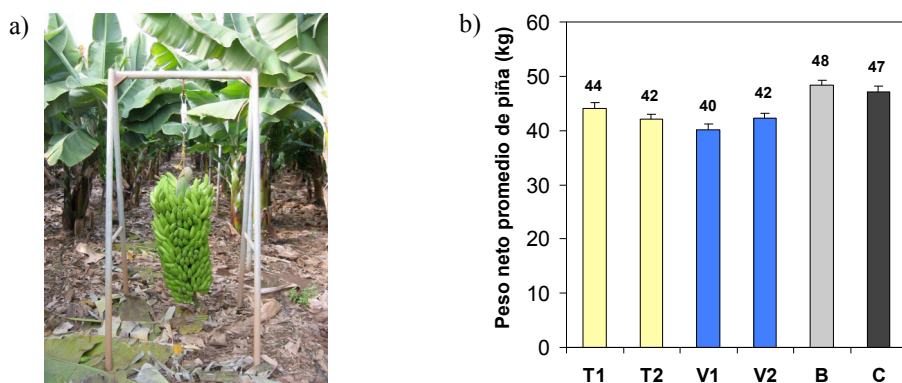


Figura 4. a) Pesado de piña en el momento de la recolección. b) Producción neta promedio (con barras de error estándar) obtenida con las diferentes estrategias de programación de riego ensayadas.

Con las estrategias de programación de riego en función del contenido hídrico del suelo (T1, T2, V1 y V2) se obtuvieron pesos netos inferiores y estadísticamente diferentes a las estrategias B y C. Asumiendo un 5% de pérdidas, las producciones calculadas a partir del peso bruto de la piña oscilaron entre los 67 – 82 t/ha (Tabla 3). Estos datos están próximos a las 80 t/ha de rendimiento medio de referencia para explotaciones bajo invernadero en Tenerife (Galán Saúco y Cabrera Cabrera, 2002).

A pesar de haber obtenido producciones inferiores, las estrategias de programación del riego teniendo en cuenta el estado hídrico del suelo permiten una reducción importante del gasto de agua y en consecuencia de abono. En este sentido, disminuiría también la posible generación de lixiviados. Aunque actualmente no sea rentable la pérdida de producción, estas técnicas son las más recomendables desde un punto de vista ambiental, aunque es necesario seguir investigando para optimizar su funcionamiento y mejorar su productividad. Además, debe tenerse en cuenta que el coste del agua de riego experimenta incrementos continuamente (a fecha de marzo de 2009 éste ascendía ya a 0.50 €/m³). Con la estrategia B, la reducción del consumo hídrico en un 26%, no afecta significativamente a los ingresos al obtenerse producciones entorno a 80 t/ha.

Los sistemas de programación del riego con un mayor número de sensores no presentaron resultados significativamente diferentes en cuanto al consumo de agua y la producción de plátanos, frente aquellos que usaron menor cantidad de sensores para el seguimiento del estado hídrico del suelo. En consecuencia, para explotaciones pequeñas con pocas subunidades y temporizadores sencillos, el uso de tensiómetros con relé-selector (Sistema T1) constituye la estrategia más económica y simple de manejar, aunque ofrece poca flexibilidad para fijar los criterios de activación y desactivación del riego. En explotaciones agrícolas con cierto grado de tecnificación se recomienda el uso de un dispositivo GP1 con sondas de capacitancia EC-5 (Sistema V1). Aunque para obtener lecturas fiables con estos sensores se requiere una adecuada calibración específica para el tipo de suelo, este sistema ofrece una solución económicamente intermedia, con la ventaja adicional de poder realizar el registro de la evolución de los datos proporcionados por los sensores. Aunque suponga un coste mucho mayor, la estrategia que ha mostrado más fiabilidad y ha ofrecido más posibilidades de operación ha sido la combinación de tensiómetros con transductor de succión y un registrador-actuador (Sistema T2). Este sistema proporciona flexibilidad en la programación de los criterios de riego (promediado, análisis individual o por grupos de tensiómetros, etc.); el registro de datos es flexible, y el uso del registrador-actuador permite la posibilidad de acceso remoto. Tiene las desventajas de que requiere de un sistema de alimentación externo y que no permite lecturas directa en campo.

4. CONCLUSIONES

Las estrategias evaluadas con este trabajo y diseñadas para el manejo sostenible del riego en la zona no saturada del suelo, plantean una línea de investigación interesante. Todos los sistemas ensayados con el cultivo de la platanera han respondido correctamente y cabe destacar que, entre las diversas estrategias utilizadas, la automatización del riego mediante sensores micrometeorológicos (para satisfacer el 75% de la

evapotranspiración potencial) permitió conseguir una reducción del consumo de agua del 26% con respecto a la técnica de riego según el criterio del agricultor. Esto supone un consumo anual entorno a los 4800 m³/ha manteniendo los rendimientos del cultivo alrededor de 80 t/ha. Los sistemas de programación de riegos basados en el estado hídrico del suelo tuvieron un comportamiento similar entre sí en cuanto al consumo hídrico del cultivo, independientemente de la complejidad de los dispositivos empleados. Con estos sistemas, el gasto en agua de riego se redujo alrededor de un 50% respecto a la técnica de riego siguiendo el criterio del agricultor, pero se observó una disminución de la producción obtenida. Las plantas no mostraron síntomas visibles de estrés hídrico, por lo que la menor producción podría explicarse como consecuencia de que con la reducción del agua aplicada a la platanera se aportó también una menor cantidad de abono, debido a la imposibilidad de intervenir en el sistema de fertilización de la finca, ya que éste era común a otras parcelas. El control del abonado plantea un nuevo campo de experimentación, ya que la reducción previsible de los consumos de agua implica el uso de soluciones fertilizantes más concentradas, con el consiguiente aumento de conductividad eléctrica, o también la reducción de la cantidad de abono aplicado, al reducirse las pérdidas por lixiviación.

Estos resultados sugieren continuar con la investigación y el desarrollo de los sistemas de programación de riego basados en el estado hídrico en la zona no saturada del suelo. Se trata de conseguir que con este tipo de estrategias se pueda actuar de forma autónoma sobre el cabezal de las fincas: activando y desactivando el riego, modificando la fertilización para adecuarla al consumo hídrico de cada momento e incluso aplicando puntualmente fracciones de lavado. En un futuro próximo podrán utilizarse también dispositivos que utilicen sensores inalámbricos y sistemas de acceso remoto que faciliten al agricultor el control del riego a través de Internet o del teléfono móvil.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación RTA2005-205. El grupo investigador quiere agradecer al propietario de la finca de ensayo, Agritaba S.L., a su equipo técnico y de campo, así como a la Sección de Plátanos de la Cooperativa Cosecheros de Tejina, la colaboración desinteresada que prestan en el desarrollo de este proyecto de investigación. A. Ritter agradece la cofinanciación procedente del Fondo Social Europeo.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith, 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Álvarez de la Peña, F.J., 1981. *Cultivo de la platanera*. Ministerio de agricultura. Madrid.
- Burt C.M., R.E. Walker y S.W. Styles, 1992. *Irrigation system evaluation manual*. Irrigation Training and Research Center. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California.
- CIAT-Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2008. *Plan Hidrológico de Tenerife. Documento de trabajo para proceso de participación pública*. Consejo Insular de Aguas del Cabildo Insular de Tenerife.
- Dukes, M.D., E.H. Simonne, W.E. Davis, D.W. Studstill y R. Hochmuth, 2003. Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. pp. 665-674. *Proceedings of 2nd International Conference on Irrigation and Drainage*. Phoenix, AZ.
- Galán Sauco, V. y J. Cabrera Cabrera, 2002. Cultivo bajo invernadero. pp. 11-21. En: D. Fernández Galván y P.M. Hernández Delgado (eds.). *Actividades del ICIA en Platanera*. Gobierno de Canarias.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55, 2427-2436.
- Marsal, J., M. Mata, A. Arbones, J. Rufat y J. Girona, 2002. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *European Journal of Agronomy* 17, 111-122.
- Muñoz-Carpena, R. y A. Ritter, 2005. *Hidrología Agroforestal*. Madrid: Mundi-Prensa Libros, SA.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter y D. Bosch, 2004. Field methods for monitoring soil water content and Flow. Chapter 5, pp. 167-195. En: J. Álvarez-Benedí y R. Muñoz-Carpena (eds.). *Soil-Water-Solute Process Characterization: An Integrated Approach*. Boca Ratón: CRC Press.
- Muñoz-Carpena, R., M.D. Dukes, Y. Li y W. Klassen, 2008. Design and field evaluation of a new controller for soil water-based irrigation. *Applied Eng. in Agriculture* 24, 183-191.
- Phene, C.J. y T.A. Howell, 1984. Soil sensor control of high frequency irrigation systems. *Transaction of the ASAE* 27, 392-396.
- Rodrigo López, J. y J.M. Hernández Abreu, 1985. Localised banana irrigation systems evaluation in the Canary Islands. Proc. 3rd International Drop/Trickle Irrigation Congress. *American Society of Agricultural Engineers*, 281-287.
- SACT-Servicio de Agricultura del Cabildo de Tenerife, 2004. *Estudio sobre consumos hídricos agrícolas, evaluación de sistemas de riego y estimación de la eficiencia de los regadíos de la Isla de Tenerife*. Cabildo de Tenerife.
- Smajstrla, A.G. y R.C. Koo, 1986. Use of tensiometers for scheduling of citrus irrigation. *Proc. of the Florida State Horticultural Society* 99, 51-56.
- Smajstrla, A.G. y S.J. Locascio, 1996. Tensiometer-controlled drip irrigation scheduling of tomato. *Applied Eng. Agric.* 12, 315-319.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.