

EL RIEGO POR GOTEO EN ALGODON



JUNTA DE ANDALUCIA

Consejería de Agricultura y Pesca

DIRECCION GENERAL DE INVESTIGACION Y EXTENSION AGRARIAS

RIEGO POR GOTEO EN ALGODON

Se prohíbe la reproducción parcial o íntegra de esta publicación, sin la autorización expresa de autor/es, o editor.

Publicación de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

Edita: DIRECCION GENERAL DE INVESTIGACION Y EXTENSION AGRARIAS.

CENTRO DE INFORMACION Y DOCUMENTACION AGRARIA. SEVILLA.

Colección: TECNICA-INFORMACION TECNICA, N.º 11/91.

Autores: L. Mateos, F. Orgaz y E. Fereres.

Diseño: HELIODORO FERNANDEZ LOPEZ.

Depósito Legal: SE-1.120-1991

Fotocomposición: FOTOTEC.

IMPRIME: PAO. SUMINISTROS GRAFICOS, S.A.

RIEGO POR GOTEO EN ALGODON

Luciano Mateos *
Francisco Orgaz **
Elías Fereres * ****

* Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias,
Departamento de Suelos y Riegos, Córdoba

** Instituto de Agronomía y Protección Vegetal, CSIC, Córdoba

*** Universidad de Córdoba,
Departamento de Agronomía

1. INTRODUCCION

A principios de los 80 surgió entre algunos algodoneros andaluces, especialmente de Las Marismas de Sevilla, cierto interés por el riego por goteo para sus cultivos de algodón. Este interés fue originalmente suscitado por algunas casas comerciales basándose en experiencias previas en Israel, Arizona y California. A partir de 1983, un grupo de investigadores del Servicio de Investigación Agraria de la Junta de Andalucía y de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Córdoba, comenzaron a evaluar las posibles ventajas del riego por goteo en algodón y a estudiar el mejor diseño y manejo del sistema (Cuevas et al., 1985; Fereres et al., 1985). Con ello se pretendió proporcionar información objetiva a los agricultores para decidir la sustitución o no de su sistema tradicional de riego por el de goteo, y que les sirviera también para manejar correctamente el riego por goteo en el caso de que adoptaran esta innovación. Estos trabajos se continuaron hasta 1987 tanto en Las Marismas de Sevilla (Mateos et al., 1991c) como en el Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Córdoba (Mateos et al., 1991ab). De la experiencia obtenida con estos trabajos surge ahora esta Monografía que, con un enfoque eminentemente práctico, pretende transferir a los agricultores los conocimientos adquiridos acerca del manejo y la programación del riego por goteo del algodón. En 1986, la Consejería de Agricultura divulgó resultados preliminares en su Hoja de Información Técnica nº 8. En dicha Hoja ya se hacía mención de los buenos resultados obtenidos con riego por goteo en los algodinales de los suelos salinos de Las Marismas. También se ponía de manifiesto la igualdad de los riegos por goteo y por surcos en cuanto a rendimiento, cuando el algodón se cultiva en los suelos no marginales del Valle del Guadalquivir. Efectivamente, el riego por goteo en algodón ha tenido relativo éxito entre los agricultores de las zonas salinas de Las Marismas mientras que su expansión en otras zonas del Valle ha sido, hasta ahora, muy limitada.

2. ENSAYOS DE RIEGO DEL ALGODON EN ANDALUCIA

2.1. Comparación entre el riego por goteo y el riego por surcos

Ensayos realizados en Córdoba durante las campañas de 1985, 1986 y 1987 mostraron que los rendimientos de algodón están más condicionados por el manejo del riego que por el método de riego utilizado (Mateos et al., 1991b). En cualquier caso, tanto bajo riego por goteo como bajo riego por surcos pueden alcanzarse altos rendimientos, superiores incluso a los 5000 kg/ha en condiciones experimentales (Mateos et al., 1991b).

Resultados similares se han obtenido en fincas de la Vega de Sevilla donde se contaba simultáneamente con parcelas comerciales de algodón regadas por goteo y parcelas de algodón regadas por surcos (Mateos, 1988). En definitiva, el riego por goteo del algodón en suelos no marginales del Valle del Guadalquivir es un método alternativo, pero su adopción debe depender más de factores económicos y de manejo que de sus efectos sobre los rendimientos, ya que no se pudo demostrar su superioridad respecto a un riego convencional bien manejado.

El caso es distinto cuando se trata de fincas con suelos salinos, como son los de Las Marismas del sur de Sevilla. En estas condiciones, los rendimientos con riego por goteo pueden superar en más de 1000 kg/ha a los obtenidos con riego por surcos en los suelos menos recuperados (Mateos et al., 1991c).

Sobre el diseño del sistema de riego, goteros espaciados 1 m en ramales situados cada dos hileras de plantas es el diseño más adecuado (Cuevas et al., 1985; Mateos et al., 1991c). Estos espaciamientos concuerdan además con la práctica común en otros países donde se utiliza riego por goteo en algodón.

2.2. Respuesta del algodón al riego

Paralelamente a los estudios de riego por goteo, se realizaron en Córdoba otros trabajos destinados a evaluar las respuestas del algodón al riego y al déficit hídrico. Estos trabajos permitieron determinar la evapotranspiración máxima y los niveles óptimos de evapotranspiración para las condiciones ambientales del Valle del Guadalquivir (Orgaz et al., 1991ab). Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 1. En ella puede observarse que el nivel óptimo de ET se acerca tanto más a la ET_{max} del cultivo cuanto más larga es la estación de crecimiento y más precoz la variedad cultivada. Por ejemplo, para una estación de 144 días, la ET óptima es el 70% y el 79% de la ET máxima para las variedades Coker-310, la más cultivada en Andalucía, y Jaén, variedad de ciclo corto, respectivamente. Si la longitud de estación es 159 días, la ET óptima es 83% y 95% de la máxima para Coker-310 y Jaén respectivamente. Más adelante en esta Monografía se explica como pueden introducirse estos resultados en el caso práctico de la programación del riego por goteo del algodón.

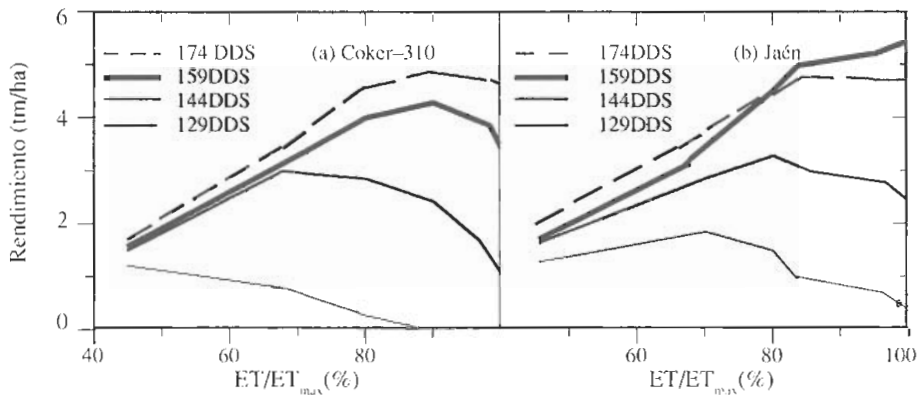


Figura 1. Relación entre la producción de fibra y semilla y la evapotranspiración estacional, relativa a la máxima, para distintas fechas después de siembra (DDS). (a) Coker-310 y (b) Jaén. Tomado de Orgaz et al. (1991).

3. OBJETIVOS Y DESTINATARIOS DE ESTA MONOGRAFIA

Con la presente Monografía pretendemos dar pautas que sirvan a técnicos y agricultores para programar los riegos del algodón, en particular si disponen de riego por goteo. No hemos querido ceñirnos a dar recetas rígidas sino que más bien damos los criterios que deben seguirse en la programación del riego, así como los métodos necesarios para su aplicación. Primero describimos dos métodos que por su sencillez son sólo aproximados. El primero de ellos consiste en un calendario de riego medio y el segundo se basa en la medida de la velocidad de expansión foliar como indicador del estado hídrico del cultivo. Para los algodoneiros que quieran afinar más en la programación del riego por goteo, describimos el método del balance diario de agua. Este método requiere información sobre los consumos de agua (evapotranspiración, ET), del cultivo y la aportación de agua de riego y lluvia. También ofrecemos criterios para decidir cuándo iniciar los riegos, cómo recortarlos al final de campaña y qué hacer en condiciones salinas. La Monografía la cerramos presentando dos métodos alternativos para la programación del riego por goteo en algodón. El primero de ellos utiliza el potencial hídrico en la hoja al mediodía como indicador, y su aplicación requiere el uso de un aparato denominado cámara de presión. El segundo se basa en la medida de la temperatura foliar con sensores de radiación infrarroja.

El objetivo de esta Monografía es facilitar la programación de los riegos a técnicos y agricultores que deseen usar métodos técnicos para alcanzar un máximo aprovechamiento del agua de riego. Parece lógico que, una vez realizada la costosa inversión que significa



una instalación de riego por goteo, el agricultor maneje su instalación con criterios modernos de eficacia. Para ello, se ofrecen además programas de ordenador que podrán utilizarse en ordenadores personales y que facilitan la aplicación de los métodos descritos. Con esto queremos dar la oportunidad a los agricultores más avanzados de emplear técnicas informáticas y sumarnos con ello a la tendencia de informatización en agricultura.

4. METODOS DE PROGRAMACION DEL RIEGO

4.1. Métodos aproximados de programación

4.1.1. *Calendario medio de riego*

Este método se fundamenta en que, en nuestra zona, la evapotranspiración del algodón varía poco de año a año. Esto permite elaborar calendarios de riego aproximados basados en las necesidades de agua medias. Ese es el tipo de calendario que presentamos en la Tabla 1 para un caso concreto de diseño. Si el marco o el caudal de los goteros es distinto, bastará con transformar la columna de tiempo de riego (en caso de duda sobre cómo hacerlo, puede consultarse la Ecuación 5 más adelante en esta Monografía). Las dosis de riego presentadas en la Tabla 1 son para un cultivo bien desarrollado que hacia mediados de junio cubre al menos un 30% del suelo. Si el cultivo está más adelantado o más retrasado que el del ejemplo, bastará con aumentar o disminuir respectivamente entre un 10% y un 20% los valores de necesidades de riego de las dos primeras decenas (dos primeras filas de la Tabla 1). En cuanto a la última decena de agosto y la primera de septiembre, los valores de necesidades de riego deberán disminuirse si las cápsulas han empezado a abrir a finales de agosto o si existe abundante cantidad de agua almacenada en el suelo.

TABLA 1

Intervalo	Necesidades netas mm/día	Tiempo diario de riego
21-30 de junio	5.0	5h
1-10 de julio	6.9	6h 55m
11-20 de julio	7.8	7h 50m
21-31 de julio	7.6	7h 35m
1-10 de agosto	7.3	7h 20m
11-20 de agosto	6.9	6h 55m
21-31 de agosto	5.6	5h 35m
1-10 de septiembre	4.2	4h 10m

Caudal de los goteros: 2 litros/hora
Marco de los goteros: 1 gotero cada 2m²

4.1.2. Crecimiento vegetativo

a) El crecimiento vegetativo como indicador de déficit hídrico

El crecimiento vegetativo en algodón es muy sensible al estrés hídrico, por lo que medidas de la elongación del tallo o la expansión foliar pueden reflejar el grado de déficit hídrico que sufre la planta. Nuestros estudios muestran que las medidas del crecimiento foliar son mejores que las de elongación del tallo como indicadores del grado de estrés hídrico en algodón, al menos para las variedades cultivadas en Andalucía. Desafortunadamente, la relación entre grado de estrés hídrico y velocidad de expansión foliar (VEF) no es única, como tampoco lo es la VEF que indica si el riego es óptimo o no lo es. Para un grado de déficit hídrico determinado, la VEF aumenta conforme la temperatura aumenta. Por otro lado, conforme la carga de cápsulas aumenta, la expansión foliar disminuye aunque el nivel de riego sea óptimo. Estos dos aspectos nos obligan a hacer corresponder cada grado de déficit hídrico con un intervalo de VEF en vez de con valores concretos. La Figura 2 (adaptada de Orgaz, 1988) representa esta relación para la segunda decena de junio y las dos primeras decenas de julio. Esta es la época en la que el desarrollo vegetativo es máximo y el manejo del riego por goteo es crítico en algodón

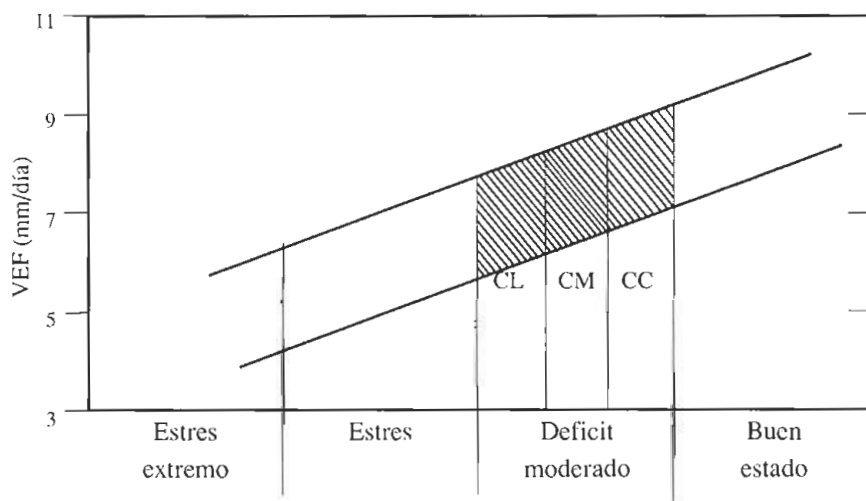


Figura 2. Relación entre el grado de déficit hídrico y la velocidad de expansión foliar (VEF). CL, CC y CM significan ciclo largo, corto y medio respectivamente. Adaptado de Orgaz (1988).

b) Uso de la VEF en la programación de los riegos

Dado que el grado de déficit hídrico deseable varía con la longitud del ciclo de las variedades y con la duración de la estación de cultivo, la VEF que indica que el riego es óptimo también depende de estos factores. Si no hay limitaciones de ciclo, bien porque la estación de cultivo es muy larga en esa zona concreta, bien porque se ha sembrado bajo plástico o bien porque la variedad cultivada es de ciclo corto, la VEF deseable será mayor que en el caso de que haya limitaciones de ciclo por razones contrarias a las dichas. Esto

lo hemos expresado en la Figura 2 dividiendo la zona de déficit moderado en tres subzonas para la determinación de la VEF óptima. Con ciclo corto, medio y largo nos referimos a la longitud del ciclo de variedades tipo Jaén, Coker-310 y Acala respectivamente. Si la estación de cultivo disponible es larga, bien porque lo es de por sí en esa zona o bien porque se sembró bajo plástico, la VEF óptima para variedades con longitud de ciclo tipo Coker-310 será la de la subzona denominada «Ciclo corto» en la Figura 2. Para una variedad con ciclo tipo Acala cultivada en las condiciones mencionadas, la VEF óptima será la de la subzona «Ciclo medio» en la misma figura.

Queremos insistir en que la Figura 2 fue obtenida a principios del período de floración mientras el algodón se desarrollaba vegetativamente. Nuestras recomendaciones son por tanto válidas para controlar el riego por goteo sólo durante ese período, aunque pensamos que ese es el período más crítico en el riego del algodón. Estas recomendaciones son también aplicables a los riegos primero y segundo cuando se practica riego por surcos o de alta frecuencia en general.

c) Proceso de medida de la VEF

1. Seleccionar una hoja de unos 5 a 6 cm que esté situada en la parte más alta del tallo principal.

2. Eliminar cuidadosamente con las uñas el extremo seco de la hoja. Este extremo seco no es más que un piquito de 1 o 2 mm.

3. Colocar el cero de una regla milimetrada en la base de la hoja (inserción del limbo con el pecíolo) y medir la longitud hasta el extremo de la hoja. La identificación del punto de la base donde se coloca el cero de la regla deberá ser precisa pues al día siguiente tendrá que medirse desde el mismo punto. En caso de duda, este punto podrá marcarse con rotulador fino.

4. Al día siguiente deberá volverse a medir la longitud en la misma hoja siguiendo el mismo criterio que en el punto 3. Por diferencia entre las medidas realizadas en días consecutivos se conocerá la VEF. Es muy importante que las medidas entre dos días consecutivos se realicen a la misma hora. Una misma hoja podrá medirse durante tres días consecutivos con lo que se obtendrán dos valores de VEF. Si la longitud de la hoja el primer día es próxima a 6 cm y la VEF es superior a 9, esa hoja no deberá medirse más de dos días.

5. Para tener una estimación representativa de la VEF de la parcela, las medidas explicadas en los puntos anteriores deberán realizarse en 10 ó 12 hojas. Las hojas deberán marcarse y numerarse para evitar confusiones. Si existe alta variabilidad espacial en la parcela, el número de hojas seleccionadas deberá incrementarse.

4.2. Método del balance de agua

La ecuación del balance de agua en el suelo establece que, para un período dado de tiempo, la cantidad de agua que entra en la parte del suelo en la que existe extracción radicular, menos la cantidad de agua que sale de esa misma parte del suelo, tiene que ser igual a la variación del contenido de agua (ΔA):

$$\Delta A = LL + R - P - ET + CCF \quad (1)$$

donde LL, R, P, ET y CCF son lluvia, riego, percolación, evapotranspiración y contribu-

ción de la capa freática respectivamente ocurridas en el período en el que se realiza el balance.

La filosofía del riego por goteo es mantener el contenido de agua del suelo en un nivel constante, es decir, hacer $\Delta A = 0$. Por otro lado, el valor de P debe ser lo menor posible o nulo con el objeto de aumentar la eficiencia del riego. Hay casos en los que conviene mantener cierta tasa de percolación para lavar sales del suelo pero este aspecto se tratará más adelante. CCF es un valor difícil de cuantificar hasta la fecha. Es despreciable en cualquier parcela donde la capa freática es muy salina o se encuentra por debajo de los 2 m. Sin embargo, en presencia de capas freáticas superficiales, su valor puede superar el 50% de la ET del algodón (Wallender et al., 1979). El modelo que aquí proponemos prescinde del término CCF por lo que su aplicación está limitada en parcelas donde CCF pueda ser importante. De la Ecuación 1 simplificada pueden entonces obtenerse las necesidades de riego netas (NR_n) de la siguiente forma:

$$NR_n = ET - LL \quad (2)$$

de donde se obtienen las necesidades de riego.

ET se obtiene a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) multiplicándola por el coeficiente de cultivo (K_c):

$$ET = K_c ET_0 \quad (3)$$

Existen varios métodos de estimación de ET_0 a partir de datos climáticos. La revisión



de estos métodos queda fuera de los objetivos de esta Monografía pero podrá encontrarse información completa en Doorenbos y Pruitt (1977). El método más adecuado es el de Penman modificado por FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977). El cálculo de ET_o por este método requiere medidas de radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento. Además, para conseguir mayor precisión con el uso de esta fórmula, es conveniente calibrarla localmente. Aunque existen varias estaciones meteorológicas en Andalucía donde se miden las variables climáticas necesarias para el cálculo de ET_o mediante la fórmula de Penman, la disponibilidad de estos datos no es la deseable. Un método alternativo al de Penman y de uso más fácil a nivel finca, es el basado en medidas de evaporación (E) desde tanque evaporimétrico Clase A (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$ET_o = K_p E \quad (4)$$

donde K_p es el coeficiente de tanque cuyo valor podrá determinarse para cada caso según se explica en el Apéndice I.

El valor de K_c depende del estado de desarrollo del cultivo. Su evolución la hemos determinado en Córdoba y está representada en la Figura 3. Para acoplar la función de K_c al estado de desarrollo del cultivo, recomendamos medir el porcentaje de cobertura al iniciar la campaña de riego. Con este valor podrá fijarse el K_c y el día del inicio del riego en el eje de abscisas de la Figura 3 con lo que el valor de K_c queda definido en adelante. El porcentaje de cobertura se obtiene midiendo el ancho de la franja verde de las hileras de plantas, dividiendo este ancho por la distancia entre hileras y multiplicando por 100. No obstante, como se explicó en el apartado 2.2 en el caso de variedades de ciclo largo cultivadas en zonas de estación corta, puede ser recomendable practicar riego deficitario. Esta práctica puede introducirse corrigiendo el valor de K_c en función de la variedad cultivada, la longitud media de la estación de cultivo y el nivel de riesgo que esté dispuesto a asumir el agricultor. Una forma racional de hacer esta corrección se utiliza en el programa 'KCGOT' (Apéndice IV).

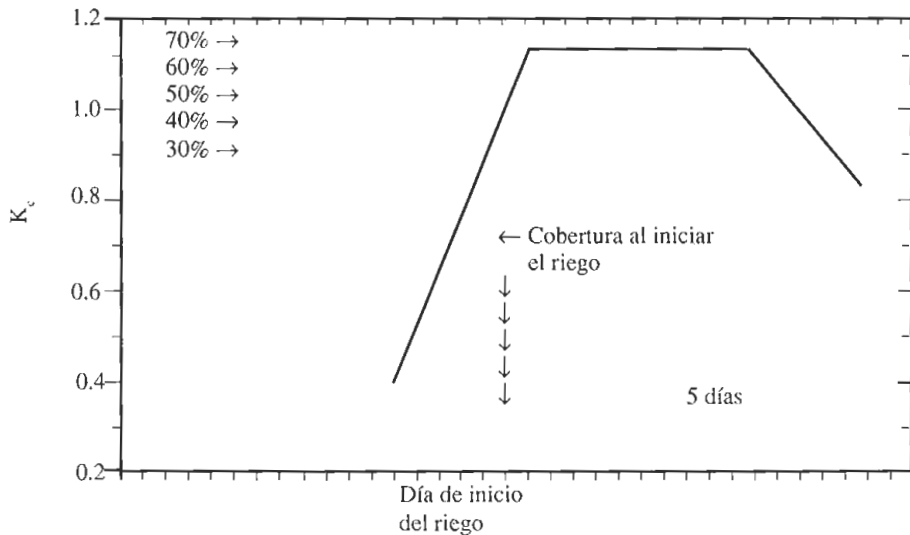


Figura 3. Función del coeficiente de cultivo (K_c) para algodón regado por goteo. (Mateos, 1988).

Las necesidades de riego brutas (NR_b) se calculan por la siguiente expresión:

$$NR_b = \frac{NR_n}{E_a} \quad (5)$$

donde E_a es la eficiencia de aplicación de agua (en el Apéndice II se explica un método para la medida de E_a). Una vez calculadas las necesidades de riego, basta con medir el agua aplicada mediante caudalímetros o, si no se dispone de ellos, puede calcularse el tiempo de riego (T) por la siguiente expresión:

$$T(\text{horas}) = \frac{NR_b \text{ (mm)} S \text{ (m}^2\text{/gotero)}}{Q \text{ (litros/hora/gotero)} E_a} \quad (6)$$

donde S es el marco de los goteros y Q el caudal de los goteros.

Las estimaciones de ET_o pueden hacerse diariamente durante la campaña de riego (lo que se llama programación en tiempo real). En el disquete que se ofrece en esta Monografía se facilita un programa de ordenador llamado «GOTAL» (Apéndice IV) que permite calcular las necesidades y el tiempo diario de riego a partir de estimaciones de ET_o realizadas en tiempo real (para lo que lecturas de tanque Clase A son lo más práctico) o de medias obtenidas a partir de la fórmula de Penman en varias localidades del Valle del Guadalquivir (F.J. Villalobos, datos no publicados).

4.3. Iniciación de los riegos

Algunos agricultores aplican un riego en siembra para facilitar la nascencia de las plantas. Sin embargo, al hablar de la iniciación de los riegos nos referimos al inicio de la campaña de riegos. Si este inicio es demasiado temprano el riego puede enfriar el suelo en la época en que las bajas temperaturas limitan el crecimiento, o puede retrasar la maduración debido a una descompensación entre los crecimientos vegetativo y reproductivo a favor del primero. Proponer una fecha fija para iniciar los riegos no sería adecuado porque ignoraría la contribución (variable de un año a otro) de la lluvia primaveral, así como el estado de desarrollo del cultivo.

Lo más adecuado para decidir la fecha de iniciación de los riegos es utilizar algún criterio basado en medidas en planta como son la medida de la VET (apartado 4.1.2) o los métodos que proponemos más adelante en el apartado 4.6. Desde el punto de vista práctico este momento suele ocurrir entre una y dos semanas antes del comienzo de la floración, o lo que es lo mismo, entre una y dos semanas después de la aparición de los primeros botones florales.

Una práctica recomendable cuando el algodón se riega por goteo, es llenar de agua el perfil del suelo al inicio de la campaña de riegos. La reserva de agua va a evitar que averías del sistema o días de demanda evaporativa muy alta provoquen estrés hídrico severo que afecte a los rendimientos.

4.4. Recorte de los riegos

El riego por goteo da la posibilidad de someter el algodón a un déficit hídrico progresivo al final de la campaña que, por un lado favorezca la apertura de las cápsulas sin frenar drásticamente el desarrollo de las más jóvenes, y por otro lado permita agotar el agua

del perfil del suelo con el objeto de aumentar la eficiencia en el uso del agua. Una estrategia racional de recorte de riegos se basa en determinar una fecha en la que queremos el algodón en estado de marchitez permanente y otra fecha en la que iniciar el recorte. Esta segunda fecha debe ser función del estado de desarrollo del cultivo así como de la cantidad de agua almacenada en el momento del inicio del recorte. Una vez fijadas estas dos fechas podrá establecerse una función de recorte que permita agotar progresivamente el agua del perfil.

Este tipo de estrategia es el propuesto por el programa 'GOTAL' para fechas posteriores al 10 de agosto. Las entradas necesarias son el déficit de agua en el suelo en el momento del inicio del recorte y el déficit de agua en el suelo deseado en la fecha 10 de octubre. El programa calcula un factor de recorte que multiplicado por la ET produce la dosis de riego. El factor de recorte es una función lineal cuyo valor inicial es 1. La pendiente se calcula iterativamente con el objetivo de terminar de consumir el total de agua extraíble del suelo el día 10 de octubre.

Este método requiere conocimiento de la capacidad de campo del suelo y del contenido de agua en el suelo al iniciarse el recorte. La capacidad de campo se corresponde con el contenido de agua en el suelo después de saturado y drenado. Su valor puede estimarse a partir de datos texturales y tablas (Doorenbos y Pruitt, 1977) o puede determinarse en campo saturando un perfil de suelo desnudo, cubriéndolo con un plástico y midiendo al cabo de 4 ó 5 días su contenido de humedad volumétrica en una profundidad de 1.5 m. Para conocer el déficit de agua en el suelo en el momento de iniciar el recorte del riego, habrá que determinar en ese día la humedad volumétrica en una profundidad de 1.5 m. La diferencia entre el valor de capacidad de campo y el de la humedad medida al iniciar el recorte, nos da el déficit buscado.

El déficit que debe pretenderse para la fecha de recolección (que hemos fijado como 10 de octubre) depende de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Su valor debe estar alrededor de 190 mm en un suelo de textura fina (franco-arcilloso), 130 mm en un suelo de textura media (franco-arcillo-arenoso o francoarenoso) y 60 mm en un suelo de textura gruesa (arenoso).

Al medir el contenido de agua en el suelo al iniciar el recorte del riego, debe tenerse en cuenta que el humedecimiento del suelo con riego por goteo no es uniforme. Una aproximación de la lámina equivalente de agua puede obtenerse midiendo el contenido de agua en la parte del perfil humedecida por un gotero (tomando muestras a unos 20 cm del gotero) y en la parte más seca (entre dos hileras de plantas donde no haya ramales portagoteros). La media de ambas medidas de humedad representa el valor del contenido de agua en un punto del campo. Este par de muestras deberá tomarse en tantos puntos del campo como se considere necesario.

Una vez que empiecen a abrir las primeras cápsulas, si el contenido de agua en el suelo es suficientemente alto, pueden aparecer rebrotes, los cuales dificultan la recolección y retrasan la maduración de las cápsulas en desarrollo. Si esto ocurriera, sería una indicación de que el recorte no es lo suficientemente severo y habría que dejar de regar hasta que cesase. El control del rebrote debe usarse como un test visual de que el recorte del riego es el adecuado.

4.5. Manejo del riego por goteo en suelos salinos

El algodón es un cultivo tolerante a la salinidad lo cual ha permitido su expansión en las zonas salinas de Las Marismas de Sevilla. No obstante, valores de CE en el extracto

saturado del suelo superiores a 7.7 dS/m, reducen los rendimientos del algodón (Maas y Hoffman, 1977). Un objetivo del manejo del riego debe ser por tanto mantener la salinidad del suelo por debajo del umbral mencionado. El riego por goteo puede reducir el daño causado por las sales ya que diluye la solución del suelo en la zona más humedecida (Bernstein y Francois, 1973). Por otro lado, las sales son desplazadas de la zona de mayor contenido de agua que es precisamente donde se da la mayor actividad radicular (Hoffman et al., 1979).

Para mantener la zona de actividad radicular con un nivel constante de sales, es necesario provocar drenaje adicional que lave las sales. Estas necesidades de lavado (NL) pueden obtenerse de la Figura 4. Las necesidades de riego brutas obtendrán en este caso como:

$$NR_b = \frac{NR_n}{1-NL} \tag{7}$$

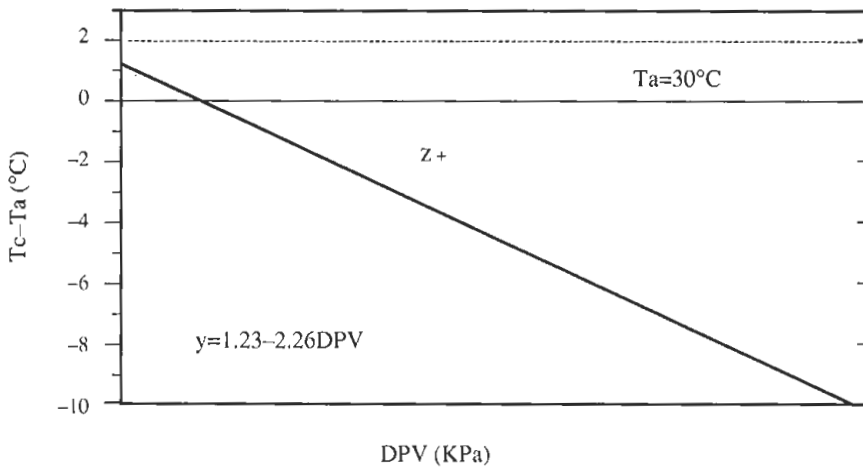


Figura 4. Necesidades de lavado para algodón en función de la conductividad eléctrica (dS/m) del agua de riego. Adaptado de Hoffman y Van Genuchten (1983).

El lavado de sales puede no ser necesario durante la campaña de riego. Si no se hace lavado se producirá acumulación de sales preferentemente en la superficie del suelo alrededor de las zonas humedecidas por los goteros. Esta acumulación puede no llegar a causar daños durante la estación de cultivo pero deberá tenerse en cuenta con cultivos posteriores, ya que la siembra sobre las zonas de acumulación de sales podría fracasar. Si las lluvias entre dos cultivos no son suficientes para eliminar las sales, antes de sembrar deberá aplicarse un riego abundante, preferentemente por aspersión o superficie.



4.6. Otros métodos de programación del riego

4.6.1. Potencial hídrico de la hoja al mediodía (Ψ)

a) Uso del Ψ y en la programación de los riegos

El potencial hídrico de la hoja es un reflejo del estado hídrico de la planta y es fácilmente medible con una cámara de presión. Grimes y Yamada (1982) propusieron que esta medida, realizada al mediodía, es un buen indicador del momento óptimo de riego en algodón, y de hecho ha tenido cierta aceptación entre agricultores de EE. UU. e Israel.

Grimes y El-Zik (1982) recomiendan dar el primer riego cuando el Ψ alcanza -16 bares. Después del primer riego, el algodón debe volver a regarse cada vez que las lecturas llegan a -18 bares, cuidando de que el potencial no baje de ese valor en el período de máxima floración. Estos valores son adecuados en España para variedades de ciclo medio (tipo Coker-310), pero si la variedad es de ciclo más corto o más largo, el criterio varía (Orgaz, 1988). A continuación presentamos algunas recomendaciones, resultado de nuestros estudios, de umbrales de Ψ (en bares) a partir de los cuales es necesario regar:

	Longitud de estación	
	Media	Larga
Ciclo tipo «Jaén»	-16	-15
Ciclo tipo «Coker-310»	-18	-16
Ciclo más largo que «Coker-310»	-20	-18

Con estación de longitud media nos referimos a la estación normal en Córdoba. Una

estación larga es la que se conseguiría en las zonas más bajas del Valle del Guadalquivir o bien sembrando bajo plástico en el mes de Marzo.

b) Uso del Ψ en la programación del riego por goteo

Lo explicado mas arriba se refiere a métodos de riego de baja frecuencia. Sin embargo, nuestros trabajos en riego por goteo han mostrado ciertas limitaciones de este indicador en algodón cuando se riega con alta frecuencia:

- i) El déficit continuo de agua, consecuencia del riego por goteo deficitario, produce en la planta una respuesta que consiste en la disminución de su tasa de crecimiento, hasta que se consigue equilibrio entre la dosis de riego, el tamaño de la planta y el potencial hídrico en la hoja. El nivel al que se estabiliza el potencial hídrico puede no estar indicando déficit hídrico si atendemos a los valores recomendados más arriba para la determinación del momento del riego en el caso de riegos de baja frecuencia. Sin embargo, el déficit hídrico puede en este caso afectar a los rendimientos finales si el tamaño de la planta es reducido (Mateos et al., 1991c).
- ii) EL Ψ puede ser un indicador arriesgado para usar en riego por goteo ya que no provee información sobre el contenido de agua en el suelo. Si hay poca agua almacenada en el perfil del suelo, la ausencia de riego durante un corto período de tiempo o una avería en el sistema, pueden inducir rápidamente estrés hídrico aunque el Ψ haya indicado recientemente buen estado hídrico del cultivo (Mateos et al., 1991a).

Sin embargo, el Ψ puede ser una buena herramienta también en riego por goteo si se atiende a las dos limitaciones antedichas. La limitación descrita en el punto (i) puede superarse si no se permiten caídas marcadas del Ψ durante el período de máximo crecimiento vegetativo, de modo que el cultivo llegue a cubrir el suelo y las plantas alcancen un tamaño adecuado. Los valores recomendables de Ψ en este período dependen de la variedad y también de la longitud de la estación de cultivo y son los especificados anteriormente. A partir de que las plantas alcanzan el tamaño deseado, el Ψ se va a estabilizar entre -12 y -17 bares. Caídas momentáneas por debajo de este intervalo significan que el cultivo está empezando a sufrir estrés hídrico. Sin embargo, el problema persiste en el valor superior del intervalo ya que es difícil predecir el Ψ por encima del cual el crecimiento vegetativo es excesivo. Observaciones de la tasa de crecimiento (apartado 4.1.3) ayudarán a determinar si el riego es excesivo o no.

Con respecto a la limitación (ii) para el uso del Ψ en algodón para programar el riego por goteo, el problema surgirá cuando las reservas de agua en el suelo disminuyan de forma que el consumo de agua diario provenga directamente del riego. Esta situación es difícil de predecir a no ser que se realicen medidas del contenido de agua en el suelo. La solución es por tanto aumentar la frecuencia de medidas del Ψ . Si esta frecuencia es 3 ó 4 días, es difícil que Ψ el descienda a valores excesivamente bajos antes de poder evitarlo aumentando la dosis de riego.

c) Proceso de medida del Ψ

Una vez discutido el uso del Ψ en algodón regado por goteo, a continuación describimos el proceso de medida:

1. Selección de la hoja más alta del tallo principal que esté totalmente expandida y expuesta al sol.

2. Introducción de esta hoja en una bolsita de plástico dentro de la cual se ha puesto previamente un trozo de papel de filtro doblado, humedecido y escurrido.

3. Corte limpio (con cuchilla de afeitar) del pecíolo de la hoja y sellado del plástico con los dedos alrededor del pecíolo. La hoja deberá mantenerse a la sombra y ser llevada rápidamente al lugar de medida.

4. Introducción de la hoja en la cámara de presión colocando el pecíolo a través del orificio de la tapadera de la cámara.

5. Cierre de la cámara y subida lenta de la presión dentro de la cámara. Esta subida de presión deberá ser aún más lenta conforme se aproxima al nivel posible del Ψ . Este proceso debe llevar entre 30 segundos y un minuto, según el nivel del Ψ .

6. Al llegar a cierta presión, se observará que los vasos de xilema en el corte del pecíolo de la hoja se abren y comienza a salir una gotita de agua. En ese momento deberá cerrarse totalmente la válvula. La lectura indicada en el manómetro es el Ψ . La salida de la gotita de agua deberá observarse con lupa. En algunos casos, antes de salir la gotita de agua aparecen algunas pompitas por los vasos del xilema cortados. Para asegurarse de que ese no es el líquido xilemático, deberán secarse las pompitas con un papel absorbente y comprobar que no sale agua.

7. Este proceso deberá repetirse con unas 8 ó 10 hojas tomadas aleatoriamente en la parcela. Si la variabilidad es alta, el número de medidas deberá incrementarse. Si existe una variabilidad notable y distribuida espacialmente, quizá convenga hacer un muestreo dividido por zonas con el fin de ajustar (si es posible) la dosis de riego de acuerdo con el estado hídrico de cada zona de la parcela.

4.6.2. *Temperatura del cultivo*

El desarrollo de sensores de radiación infrarroja ha permitido la medida remota de la temperatura de cubiertas vegetales. Si la temperatura de un cultivo de algodón es mayor que la de otro adyacente, el grado de déficit hídrico del primero es mayor que el del segundo. Pero la temperatura de un cultivo, aparte de estar determinada por su grado de estrés hídrico, depende estrechamente de otros factores climáticos. Para normalizar la temperatura del cultivo con respecto a estos factores y poder así utilizarla como indicador de estrés hídrico, Idso et al. (1981) y Jackson (1981) definieron un índice de estrés hídrico de los cultivos basado en su temperatura y lo denominaron con las siglas CWSI (del inglés «Crop Water Stress Index»).

La determinación del CWSI requiere el conocimiento de la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire ($T_c - T_a$) así como los límites máximo y mínimo de esta diferencia. El límite mínimo, $(T_c - T_a)_{\min}$, corresponde a esta diferencia de temperatura en un cultivo sin ningún estrés (cultivo recientemente regado). El límite máximo, $(T_c - T_a)_{\max}$ corresponde a esta misma diferencia pero en una parcela que está sufriendo el máximo estrés (cultivo que no transpira). El CWSI se define entonces como:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{\min}}{(T_c - T_a)_{\max} - (T_c - T_a)_{\min}} \quad (8)$$

Valores del CWSI iguales a 0 indican que no existe estrés hídrico mientras que si $CWSI=1$, el grado de estrés alcanzado por el cultivo es el máximo posible.

De trabajos realizados en Córdoba (Orgaz, 1988) se deduce que valores del CWSI

superiores a 0.2 generalmente indican estrés hídrico en algodón. Aunque éste índice no se ha utilizado en algodón regado por goteo, cabe esperar que su utilización tenga las mismas limitaciones que las del Ψ . Siguiendo un criterio parecido al propuesto para el uso del Ψ durante el período que va hasta completar el crecimiento vegetativo (cobertura total del suelo), podrían recomendarse umbrales máximos para cada variedad y longitud de estación. Utilizando la misma terminología que la usada en el caso del Ψ , los valores máximos recomendados de CWSI son:

	Longitud de estación	
	Media	Larga
Ciclo tipo «Jaén»	0.1	0.0
Ciclo tipo «CoKer-310»	0.2	0.1
Ciclo más largo que «Coker-310»	0.25	0.2

A partir de que las plantas alcanzan el tamaño deseado, el CWSI debe estabilizarse como lo hace el Ψ , y valores del CWSI superiores a 0.2 indicarían que el cultivo está sufriendo estrés y por tanto debe aumentarse la dosis de riego. También como en el caso del Ψ , el problema está en determinar a partir de este índice si la dosis de riego es demasiado alta y está provocando un crecimiento vegetativo excesivo.

Tal como se ha definido el CWSI, para su cálculo es necesario disponer de una porción de cultivo regada siempre en exceso donde poder medir $(T_c - T_a)_{\min}$. Y de otra porción donde la transpiración sea nula, para medir $(T_c - T_a)_{\max}$. Para obtener esta segunda porción



bastaría con tratar un rodal con un herbicida que suprimiese toda la actividad de las plantas, pero no destruyera su estructura. Este procedimiento puede parecer complicado por lo que Idso et al. (1981) propusieron un método alternativo que requiere la determinación previa de la relación entre $(T_c - T_a)_{\min}$ y el déficit de presión de vapor (DPV) en el aire así como la medida adicional del DPV en el cultivo cada vez que se desea determinar su CWSI. La relación $(T_c - T_a)_{\min}$ -DPV se denomina línea base y puede variar con la localidad (Idso et al., 1981). Su ecuación es del tipo:

$$(T_c - T_a)_{\min} = a + b \text{ DPV} \quad (9)$$

donde a y b son coeficientes de regresión obtenidos empíricamente. En la Figura 5 se representa la línea base obtenida en Córdoba por Orgaz (1988). El límite máximo puede obtenerse, si se conoce T_a , a partir de la ecuación:

$$(T_c - T_a)_{\max} = a [1 - b s(T_a)] \quad (10)$$

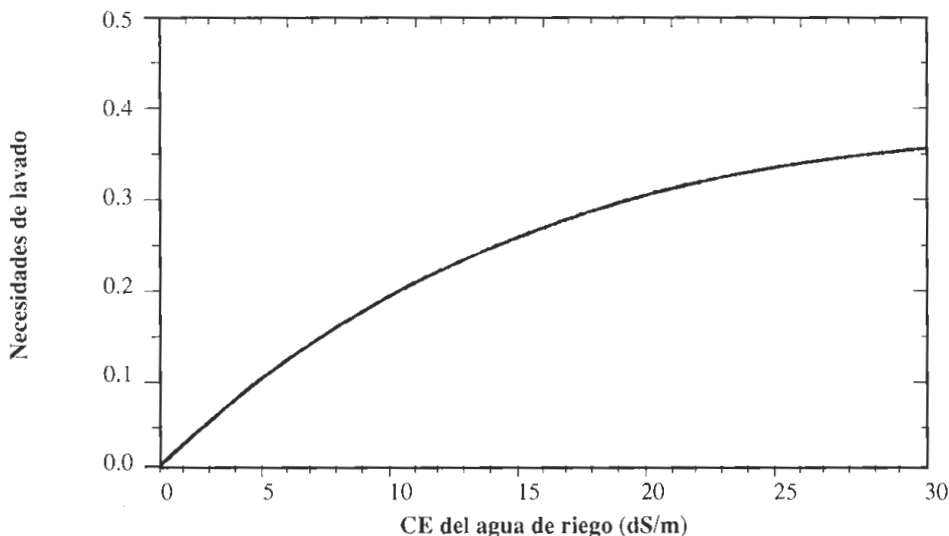
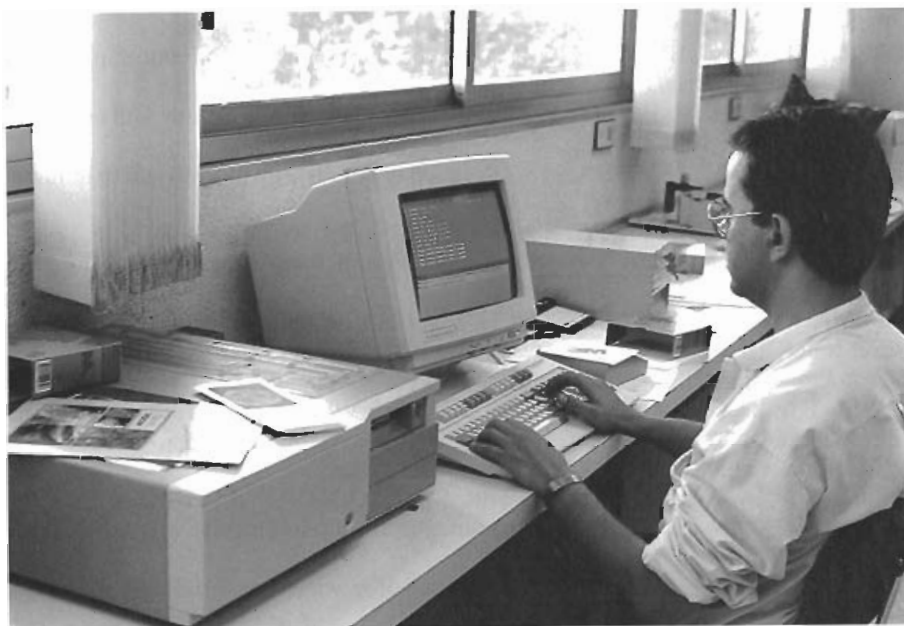


Figura 5. Relación entre la diferencia de temperatura entre un cultivo de algodón bien regado y el aire $(T_c - T_a)$ y el déficit de presión de vapor (DPV). Orgaz (1988).

donde $s(T_a)$ es la pendiente de la curva presión de vapor a saturación-temperatura (Apéndice III). Con estos supuestos el CWSI puede calcularse fácilmente. Por ejemplo, supongamos un momento en el que DPV es 3 kPa y el valor de $T_c - T_a$ es -3°C . El punto Z en la Figura 5 representa el estado hídrico del cultivo. El valor de $(T_c - T_a)_{\min}$ es -5.5°C y se obtiene de la intersección de la línea base con la vertical trazada desde DPV = 3 kPa. Por otro lado, si $T_a = 30^\circ\text{C}$ puede trazarse la horizontal correspondiente a $(T_c - T_a)_{\max}$ a partir de la Ecuación 10, siendo su valor 1.9°C en este caso. El valor del CWSI se obtiene en este ejemplo de $-3^\circ\text{C} - (-5.5^\circ\text{C})$ dividido por $1.9^\circ\text{C} - (-5.5^\circ\text{C})$ ó $2.5^\circ\text{C} / 7.4^\circ\text{C} = 0.34$.

Para facilitar el cálculo del CWSI ofrecemos un programa de ordenador denominado «CWSI» (Apéndice IV). El programa da las alternativas de calcular el CWSI a partir de: (1) medidas complementarias en porciones de la parcela sin ningún grado de estrés y totalmente secas, (2) una línea base obtenida localmente y (3) la línea base obtenida por Orgaz (1988).

Las medidas de temperatura se toman con un termómetro-pistola que deberá apuntarse de espaldas al sol con un ángulo de 30° sobre la horizontal de forma que abarque



sólo cubierta vegetal y no suelo. El DPV puede obtenerse a partir de sensores de humedad o medidas de temperaturas de bulbos seco y húmedo (Apéndice III). Tanto las medidas de temperatura como las de humedad del aire deberán tomarse a 0.5-1 m por encima del cultivo, evitando los bordes de la parcela. En cuanto al número de medidas, lo dicho para el Ψ es también aplicable a este caso. Un sensor remoto como es la pistola de infrarrojos permite además caracterizar la variabilidad espacial del estado hídrico del cultivo. Esta caracterización debería tenerse en cuenta para racionalizar posteriores muestreos e incluso para ajustar la dosis de riego por sectores cuando ello sea posible.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BERNSTEIN, L. y L.E. FRANCOIS. 1973. Comparison of drip, furrow, and sprinkler irrigation. *Soil Sci.* 115:73-76.
- CUEVAS, R., A. VIGURIA, V.P. VACA y E. FERERES. 1985. Riego por goteo en algodón bajo condiciones de salinidad en Las Marismas de Sevilla. D.G.I.E.A. Junta de Andalucía. *Información Técnica* n° 7. 12 págs.
- DOORENBOS, J. y W.O. PRUITT. 1977. *Las Necesidades de Agua de los Cultivos.* Estudio FAO: Riego y Drenaje n° 24. FAO, Roma, Italia, 194 págs.
- FERERES, E., R. CUEVAS y F. ORGAZ. 1985. Drip irrigation of cotton in Southern Spain. *Proc. Int. Drip/Trickle Irrig. Congr.*, 3rd, págs. 187-192.
- GRIMES, D.W. y K.M. EL-ZIK. 1982. *Water Management for Cotton.* Universidad de California. Bull. 1904. 17 págs.
- GRIMES, D.W. y H. YAMADA. 1982. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential. *Crop Sci.* 22:134-139.
- HOFFMAN, G.J., R.S. AYERS, E.J. DOERING y B.L. NCNEAL. 1979. Salinity in Irrigated Agriculture. En: *Design and Operation of Farm Irrigation Systems.* M.E. Jensen (Ed.). págs. 145 - 182.
- HOFFMAN, G.J. y M.T. VAN GENUCHTEN. 1983. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. En: *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.* H.M. Taylor, W.R. Jordan y T.R. Sinclair (Eds.). págs. 73-85.
- HOWEL, T.A., D.A. BUCKS, D.A. GOLDHAMER y J.M. LIMA. 1986. Management Principles. 4.1 Irrigation scheduling. En: *Trickle irrigation for crop production.* F.S. Nakayama y D.A. Bucks (Eds.). Elsevier, Amsterdam.
- IDSO, S.B., R.D. JACKSON, P.J. PINTER, R.J. REGINATO y J.L. HATFIELD. 1981. Normalising the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24:45-55.
- JACKSON, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. En: Hillel, D. (Ed.). *Advances in Irrigation.* 1:43-80.
- KARMELI, D. y J.KELLER. 1975. *Trickle Irrigation Design.* Rainbird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, CA. 133 págs.
- MAAS, E.V. y G.J. HOFFMAN. 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE. 103:115-134.
- MATEOS, L. 1988. El riego por goteo del algodón en el Valle del Guadalquivir: manejo y comparación con el riego por surcos. Tesis Doctoral. Dpto. de Agronomía. Universidad de Córdoba. 201 págs.
- MATEOS, L., J. BERENGENA, F. ORGAZ, J. DIZ y E. FERERES. 1991a. A comparison between drip and furrow irrigation in cotton at two levels of water supply. *Agric. Water Manage.* 19: 313-324.
- MATEOS, L., J. BERENGENA, M.A. SORIANO, F. ORGAZ, A. TELLEZ y E. FERERES. 1991b. Efectos del riego por goteo y del riego por surcos en la fenología y los rendimientos del algodón. *Investigación Agraria. Serie Producción y Protección Vegetales.* (en prensa).
- MATEOS, L., H. GOMEZ y E. FERERES. 1991c. Riego por goteo del algodón en Las Marismas de Sevilla. Enviado a *Investigación Agraria. Serie Producción y Protección Vegetales.*

- ORGAZ, F. 1988. Aspectos fisiológicos y agronómicos de la respuesta al riego de cultivares de algodón. Tesis Doctoral. Dpto. de Agronomía. Universidad de Córdoba. 194 págs.
- ORGAZ, F., S. BONACHELA, L. MATEOS y E. FERERES. 1991a. Desarrollo fenológico y producción de cultivares de algodón en el Valle del Guadalquivir bajo un suministro variable de agua. Investigación Agraria. Serie Producción y Protección Vegetales. (en prensa).
- ORGAZ, F., L. MATEOS Y E. FERERES. 1991b. Season length and cultivar determine the optimum evapotranspiration deficit in cotton. Agron. J. (en prensa).
- WALLENDER, W.W., D.W. GRIMES, D.W. HENDERSON y L.K. STOMBERG. 1974. Estimating the contribution of a perched water table to the seasonal evapotranspiration of cotton. Agron. J. 71: 1056-1060 .

APENDICE I

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TANQUE

El siguiente cuadro recoge los coeficientes K_p en el caso de un tanque de la clase A, para diferentes cubiertas y niveles de humedad relativa media y vientos durante las 24 horas (tomado de Dootenbos y Pruitt, 1977).

Tanque Clase A	Caso A Tanque rodeada de cubierta verde baja				Caso B ¹ Tanque con barbecho de secano			
	HR media (%)	baja <40	media 40-70	alta >70	baja <40	media 40-70	alta >70	
Vientos km/día								
		Distancia a barlovento de la cubierta verde (en m)			Distancia a barlovento de la cubierta verde (en m)			
Débiles <175	0	.55	.65	.75	0	.7	.8	.85
	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1000	.75	.85	.85	1000	.5	.6	.7
Moderados	0	.5	.6	.65	0	.65	.75	.8
	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75	.8	100	.5	.6	.65
	1000	.7	.8	.8	1000	.45	.55	.6
Fuertes 425-700	0	.45	.5	.60	0	.6	.65	.7
	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1000	.65	.7	.75	1000	.4	.45	.55
Muy fuertes > 700	0	.4	.45	.5	0	.5	.6	.65
	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1000	.55	.6	.65	1000	.35	.4	.45

1) En el caso de superficies extensas de barbechos desnudo y con un desarrollo agrícola nulo, se deben reducir los valores de K_p en un 20% en condiciones de mucho calor y vientos fuertes y en un 5-10% tratándose de una temperatura, una humedad y unos vientos moderados.

APENDICE II

EFICIENCIA DE APLICACION DE AGUA Y UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCION

La eficiencia de aplicación se define generalmente como la porción de agua utilizada por el cultivo en relación a la cantidad de agua aplicada en el riego. Las pérdidas de agua pueden deberse a escorrentía y drenaje. Las primeras son despreciables en riego por goteo mientras que las segundas son consecuencia de la variabilidad del suelo y/o de la falta de uniformidad de aplicación, siempre y cuando el agua aplicada sea igual o menor que la ET_c .

Para calcular la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación es necesario medir la descarga de los goteros. Para ello se elige un subsector de riego y de ese subsector se seleccionan 4 ramales portagoteros: el primero y el último en la tubería secundaria y otros dos intermedios, de forma que la distancia entre los 4 ramales seleccionados sea más o menos la misma. Dentro de cada uno de los 4 ramales seleccionados se medirá la descarga del primer y último gotero de cada ramal más el de otros dos goteros intermedios de forma que las distancias entre los goteros seleccionados en cada ramal sea parecida. El número de medidas será 16. Las medidas se realizan con una probeta graduada y un cronómetro o reloj con segundero, midiendo la descarga durante 30 segundos. Con el volumen y el tiempo obtenidos se calcula el caudal en l/hora.

La uniformidad de distribución (UD) se calcula según la fórmula (Karmeli y Keller, 1975):

$$UD = 100 \left(1 - \frac{Q_{25\%}}{Q} \right) \quad (\text{AIV. 1})$$

donde UD está representada en %, $Q_{25\%}$ es la media de la descarga del 25% (4 en este caso) de los emisores con caudal más reducido y Q es la descarga media de todos los emisores. Estas medidas informan sobre la calidad del sistema y sirven para conocer el valor de Q en la Ecuación 6.

La eficiencia de aplicación (E_a) se calcula por la expresión (Howell et al., 1986):

$$E_a = 1 - CV (3.634 - 1.123 (SDR^{0.3}) + 0.003 (SDR^{1.4233})) \quad (\text{AIV.2})$$

donde CV es el coeficiente de variación (cociente entre la desviación estándar de la muestra y la media de la muestra) de las medidas de descarga y SDR es la fracción (en %) de la superficie deficientemente regada (valores entre 5% y 15% son los más adecuados). Por simplicidad, si la cantidad de agua aportada se estima por los métodos aquí propuestos, puede asumirse sin error que $E_a = UD$.

La evaluación de la eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución deberá hacerse al iniciarse la campaña de riego y repetirse al menos otra vez durante la campaña. Ello permitirá el conocimiento de los valores de Q y E_a así como el estado del sistema en cuanto a atascos o mal funcionamiento de los goteros.

APENDICE III

CALCULO DEL DEFICIT DE PRESION DE VAPOR

El déficit de presión de vapor en el aire (DPV) es la diferencia entre la presión de vapor a saturación a la temperatura ambiente (e_s) y la presión de vapor en el aire (e_a):

$$VPD = e_s - e_a \quad (AI.1)$$

El valor de e_s depende sólo de la temperatura y puede calcularse por la formula:

$$e_s = 0.61078 \exp \frac{17.269 T_a}{T_a + 237.3} \quad (AI.2)$$

donde T_a es la temperatura ambiente expresada en °C y e_s esta expresada en kPa.

De la Ecuación AI.2 puede obtenerse por derivación el valor de $s(T_a)$ que aparece en la Ecuación 10:

$$s(T_a) = \frac{2502.9}{(T_a + 237.3)^2} \exp \frac{17.269 T_a}{T_a + 237.3} \quad (AI.3)$$

Las medidas mas comunes para obtener el DPV y la forma de obtenerlo, son:

a) Humedad relativa (HR).

$$DPV = \left(1 - \frac{HR}{100}\right) e_s \quad (AI.4)$$

b) Temperaturas del bulbo seco (T_a) y húmedo (T_h)

$$VPD = e_s(T_a) - e_s(T_h) + AP(T_a - T_h) \quad (AI.5)$$

donde $A = 6.6 \cdot 10^{-4} (1 + 1.15 \cdot 10^{-3} T_h)$ y P es la presión atmosférica (aproximadamente 100 kPa), $e_s(T_a)$ es la presión de vapor a la temperatura del aire (Ecuación AI.2) y $e_s(T_h)$ es la presión de vapor a la temperatura del termómetro húmedo. El valor de $e_s(T_h)$ puede obtenerse simplemente sustituyendo T_a por T_h en la Ecuación AI.2.

APENDICE IV

PROGRAMAS DE ORDENADOR

A lo largo de esta Monografía se han mencionado tres programas de ordenador que facilitan algunos de los cálculos necesarios para la programación del riego por goteo del algodón. Estos tres programas se denominan «KCGOT», «GOTAL» y «CWSI» y se distribuyen en un disquette de ordenador que puede solicitarse al editor de la Monografía. Los programas van haciendo preguntas al usuario o proponiéndole alternativas. El usuario deberá responder con el valor del parámetro correspondiente o si la pregunta pide un «Sí»

o un «No», el usuario responderá con 1 ó 0 respectivamente según va indicando el programa. En otros casos los programas ofrecen varias alternativas numeradas. El usuario deberá seleccionar una de ellas y responder con el número correspondiente. Cada vez que se responde a una pregunta o se selecciona una alternativa, deberá pulsarse la tecla «Intro» («Return» o «New line» en otros ordenadores) para que el programa siga ejecutándose.

El programa 'CWSI' es muy simple y para su utilización basta con leer el apartado 4.1.2. A continuación damos algunas explicaciones acerca de los otros dos programas.

Programa «KCGOT»

Este programa calcula un coeficiente corrector que permite ajustar el consumo de agua según la variedad cultivada, la longitud de estación (determinada por la fecha de siembra y la zona) y la cantidad de agua disponible. El modelo está basado en las funciones de producción obtenidas por Orgaz et al. (1991). El programa comienza pidiendo al usuario la variedad, la zona y la fecha en la que su cultivo se encontraba en estado de 6 hojas (esta es por tanto una fecha que el algodonero tendrá que conocer antes de utilizar «KCGOT»). A continuación el programa ofrece un cuadro (Figura 6) donde la primera columna especifica lo que denominamos «Rendimiento objetivo». Este es el rendimiento que el agricultor aspira a conseguir y que determina la «Necesidad neta de riego» que aparece en la penúltima columna del cuadro. El algodonero tendrá entonces que considerar su situación particular:

- Si la cantidad de agua de riego está limitada, el algodonero deberá utilizar la columna de «Necesidad neta de riego» como criterio para seleccionar su «Rendimiento objetivo».
- Si el agua de riego no es limitante, la longitud de estación es la que va a determinar la selección de su «Rendimiento objetivo».

En este segundo caso, el algodonero deberá fijarse en la columna donde aparece el «Rendimiento medio». El «Rendimiento objetivo» por el que se decida deberá ser próximo al correspondiente al de máximo «Rendimiento medio». En el caso de la Figura 6, el «Rendimiento medio» más alto es 4.2 tm/ha y corresponde a un «Rendimiento objetivo» de 4 tm/ha. Sin embargo, el usuario puede examinar los rendimientos que se obtendrán con distintos niveles de probabilidad. El algodonero que pretenda obtener altos rendimientos deberá elegir un «Rendimiento objetivo» alto, aunque con ello está asumiendo cierto nivel de riesgo ya que eligiendo un «Rendimiento objetivo» alto también es más probable que obtenga rendimientos bajos si la estación de cultivo se queda corta. En el caso de la Figura 6, el algodonero podría decidirse por un «Rendimiento objetivo» de 5 tm/ha. En ese caso, su rendimiento será mayor que 4.8 tm/ha en el 30% de los años. Si por el contrario selecciona un «Rendimiento objetivo» de 4 tm/ha, sus rendimientos reales con probabilidad del 30% van a ser superiores a solo 4.6 tm/ha. Sin embargo, en este segundo caso, sus rendimientos van a superar las 4.1 tm/ha en el 70% de los años mientras que con un «Rendimiento objetivo» de 5 tm/ha solo podrá asegurar que va a superar 3.8 tm/ha en el 70% de los años.

El programa da entonces la opción de probar con un «Rendimiento objetivo» distinto de los que aparecen en el cuadro en pantalla y termina pidiendo el «Rendimiento objetivo» por el que el agricultor se ha decidido. El resultado final consiste en un coeficiente corrector por el que deberá multiplicarse la función de K_c .

Figura 6

rendimiento objetivo (tm/ha)	Rendimiento (tm/ha) para probabilidades (en %) del					Rendimiento medio (tm/ha)	Necesidad neta de riego (mm)	Factor corrector
	90	70	50	30	10			
2.0	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.6	327	.55
3.0	3.4	3.7	3.7	3.9	4.0	3.7	411	.69
4.0	3.3	4.1	4.2	4.6	4.8	4.2	496	.83
5.0	2.2	3.8	4.0	4.8	5.2	4.0	580	.97
6.0	.6	3.0	3.3	4.6	5.3	3.3	655	1.10

Programa 'GOTAL'

El programa 'GOTAL' sirve para determinar las cantidades diarias de riego. Debido a que existen una serie de parámetros que, siendo necesarios para la determinación de las necesidades diarias de riego, no requieren ser medidos diariamente, el programa comienza preguntando si va a correrse por primera vez en la campaña de riego o por el contrario se ha corrido previamente. Si es la primera vez que se corre habrá que conocer parámetros como son el caudal y el marco de los goteros, la eficiencia del riego, etc. así como el porcentaje de cobertura en una fecha próxima al inicio del riego. Conociendo el porcentaje de cobertura y la fecha de su medida, el programa ajusta la función de K_c apropiada.

A partir de entonces 'GOTAL' ofrece tres opciones:

1. Estimar ET_0 a partir de lecturas de tanque Clase A
2. Utilizar otra estimación diaria de ET_0
3. Utilizar datos medios de ET_0 contenidos en el programa, en cuyo caso el programa se correrá una sola vez en la campaña y el calendario de riego aparecerá en un archivo denominado 'OUT.OUT'.

Una vez llegado el 10 de agosto, 'GOTAL' ofrece la posibilidad de iniciar un recorte del riego tal como se propuso en el apartado 4.4. Si el usuario siguió la opción 3 para estimar ET_0 y quiere iniciar un recorte en el riego, una vez que conozca el déficit de agua en el suelo al inicio del recorte y el déficit deseado con fecha 10 de octubre, deberá correr de nuevo 'GOTAL'. Así producirá un nuevo calendario de riego contenido en el archivo 'OUT.OUT' que será el que deberá seguir en adelante.

