

Modelo estacional de optimización del riego por surcos

MODELO ESTACIONAL DE OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS

Edición y Coordinación Gráfica: Analistas Económicos de Andalucía
Imprime: Imagraf (Málaga)

© Analistas Económicos de Andalucía 1999

D.L. MA-1272-99
I.S.B.N. 84-95191-15-6

Reservados todos los derechos. Queda prohibido reproducir parte alguna de esta publicación, su tratamiento informático o la transcripción por cualquier medio, electrónico, mecánico, reprografía u otro sin el permiso previo y por escrito del editor.

MODELO ESTACIONAL DE OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS

Emilio Camacho Poyato

Serafín Álvarez Ramos

Pilar Montesinos Barrios

Reunidos en la Ciudad de Sevilla el día 14 de mayo de 1999 un jurado presidido por Braulio Medel Cámara y compuesto por Javier López de la Puerta, Juan Paniagua Díaz, José Javier Rodríguez Alcaide y Francisco Villalba Cabello, decidió por unanimidad conceder a esta investigación, el 1º PREMIO UNICAJA DE ESTUDIOS AGRARIOS, "Modalidad Investigadora", convocado por Analistas Económicos de Andalucía.

Presentación

La Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía viene realizando una apuesta de futuro por el medio rural, apoyando todo tipo de iniciativas relacionadas con su desarrollo, en un contexto de Modernización de la Agricultura Andaluza.

En este sentido, la Consejería apoya firmemente la investigación y las publicaciones agrarias, porque son, entre otros, elementos decisivos para dotar de capacidad de respuesta a nuestro complejo agroalimentario.

Por ello, me complace presentar esta colección de publicaciones que recoge los trabajos ganadores de los "Premios UNICAJA de Estudios Agrarios" en las modalidades de divulgación, didáctica e investigación. En esta ocasión han sido premiados cuatro magníficos trabajos sobre riegos, frutas y hortalizas y ganadería caprina en Andalucía respectivamente. Se trata, en definitiva, de contribuciones de alto nivel al desarrollo agrícola de nuestra Comunidad Autónoma.

Con su publicación, se cumple el doble propósito de ofrecer información tanto a lectores especialistas como a otros más profanos en la materia, y son al mismo tiempo, una ocasión de reconocimiento público a sus autores. A todos ellos, mi felicitación por su esfuerzo y por la gran calidad de sus trabajos, y a UNICAJA, mi reconocimiento por el apoyo que presta a la publicación de los mismos.

*Paulino Plata Cánovas
Consejero de Agricultura y Pesca*

Prólogo

La investigación para la mejora y ampliación del conocimiento sobre la realidad socioeconómica que nos rodea constituye uno de los principales cometidos en los que se fundamenta el avance y desarrollo de la sociedad. El progreso de las sociedades modernas está profundamente unido a las relaciones económicas que en su seno se realizan, de tal forma que las actividades de carácter económico constituyen uno de los ejes principales que determinan su organización, funcionamiento y desarrollo futuro. Estas relaciones económicas presentan un alto grado de complejidad debido a la multitud de factores e interrelaciones que las conforman, lo que lleva a la necesidad de profundizar en su estudio.

Es por ello que UNICAJA viene desarrollando de forma permanente y continuada diversas acciones de apoyo a la investigación económica dentro del compromiso que mantiene con la sociedad en su conjunto para el análisis de la realidad socioeconómica en la que estamos inmersos. Dentro de estas actuaciones de apoyo a la investigación se encuadra el Premio UNICAJA de Desarrollo Económico y Estudios Agrarios que viene convocando Analistas Económicos de Andalucía. Su objetivo fundamental es incentivar la realización, y su posterior difusión, de investigaciones sobre la realidad económica que nos rodea, y en esa línea se enmarca esta nueva colección de publicaciones.

El I Premio UNICAJA se convocó con dos modalidades; una modalidad investigadora, que tiene como objetivo aquellas investigaciones con un carácter más técnico sobre los distintos factores que inciden en la actividad económica regional y una modalidad divulgadora/didáctica que tiene como referente aquellas otras investigaciones que partiendo de una base científica ofrezcan panorámicas sobre aspectos concretos de la realidad socioeconómica.

El jurado por unanimidad acordó en este caso premiar dos importantes trabajos, uno relativo a la optimización del consumo de agua en el riego agrícola y otro relativo a la comercialización agrícola en Almería. Asimismo, dada la elevada calidad de los trabajos presentados, se concedieron sendos accésit a dos investigaciones relativas al sector ganadero.

El premio en su modalidad investigadora fue otorgado al “modelo estacional de riego por surcos”, que permite obtener soluciones óptimas en cuanto a manejo y programación del riego por surcos mediante el empleo de algoritmos genéticos. El modelo es aplicable a una parcela y tiene carácter integral, es decir, analiza toda la campaña en su conjunto, siendo idóneo el uso de este programa para agricultores y técnicos de comunidades de regantes.

En la modalidad divulgadora – didáctica se premió un trabajo de investigación que pretende mostrar el importante papel desempeñado por las alhóndigas, de comercialización hortofrutícola, en el desarrollo de los cultivos bajo plástico del litoral almeriense. El trabajo, resultado de una amplia investigación, pone de manifiesto la necesidad que tiene el sistema de emprender determinadas actuaciones para adaptarse a las nuevas exigencias del mercado.

Dos accésit fueron concedidos a los trabajos de un grupo interdisciplinar de investigadores sobre el sector caprino. En uno de ellos, se estudian las posibilidades de la raza Florida como factor de desarrollo de amplias zonas de sierra y de campiña andaluzas. En otro se realiza un estudio sobre el sistema de producción de caprino extensivo de orientación cárnica de la provincia de Jaén, mediante la entrevista directa titulares de explotaciones caprinas.

Con la implantación de este premio y su continuidad en el futuro, UNICAJA amplía su apuesta por la investigación y realización de estudios sobre la realidad económica, con la certeza que serán de gran utilidad no sólo para los profesionales y estudiosos del tema, sino para todo el conjunto de la sociedad.

*Braulio Medel Cámara
Presidente de UNICAJA*

ÍNDICE GENERAL

	Págs.
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
I.1. Generalidades sobre el riego por superficie	14
I.2. Riego por surcos de escurrimiento.	15
I.3. Rentabilidad económica del agua de riego.....	16
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	17
II.1. Modelos hidráulicos de riego por superficie	19
II.2. Modelos de balance hídrico del suelo	20
II.3. Modelos de optimización: Función objetivo y función de producción	20
II.4. Optimización mediante Algoritmos Genéticos	22
CAPÍTULO III. OBJETIVOS	25
CAPÍTULO IV. MATERIAL	29
IV.1. Determinación de la pendiente	31
IV.2. Determinación de la infiltración	32
IV.3. Determinación de los parámetros geométricos del surco	34
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA	37
V.1. Modelo Estacional de Riego por Surcos	39
V.1.1. Submodelo de Humedad del Suelo	39
V.1.1.1. Balance de humedad	39
V.1.1.2. Evapotranspiración.....	39
V.1.1.3. Profundidad radicular.....	41
V.1.1.4. Percolación Profunda.....	41
V.1.1.5. Criterio de riego	42
V.1.2. Submodelo Hidráulico de Riego por Surcos	43
V.1.2.1. Ecuación de balance de volumen	43
V.1.2.2. Procedimiento de cálculo del avance superficial	45
V.1.2.3. Procedimiento de cálculo del receso	46
V.1.2.4. Volumen de percolación.....	47
V.1.2.5. Volumen de escorrentía	48
V.1.2.6. Parámetros de calidad del riego	49
V.1.3. Submodelo de Producción del Cultivo	50
V.1.3.1. Función de producción multiplicativa	50
V.1.4. Optimización Económica	50
V.1.4.1. Función objetivo	50
V.1.4.2. Caudal máximo no erosivo	51
V.1.4.3. Determinación del precio del agua de riego	53
V.1.4.4. Esquema general del modelo	54
V.2. Procedimiento de optimización: Algoritmos Genéticos	54
V.2.1. Introducción	55
V.2.2. Representación de soluciones	56

ÍNDICE GENERAL

V.2.3. Población inicial y número de generaciones	58
V.2.4. Evaluación de la función objetivo. Restricciones	59
V.2.5. Operadores Genéticos	60
V.2.5.1. Selección	60
V.2.5.2. Cruzamiento	63
V.2.5.3. Mutación	64
V.3. Asignación de valores a los parámetros del algoritmo genético	66
 CAPÍTULO VI. PROGRAMA OPTIMEC	 71
VI.1. Introducción	73
VI.1.1. Descripción y manejo del fichero base de datos "Riegos"	74
VI.1.1.1. Tablas	74
VI.1.1.2. Consultas	79
VI.1.1.3. Formularios	80
VI.2. Ejemplo de aplicación del programa Optimec	82
VI.3. Sensibilidad del modelo a los precios del agua	84
VI.3.1. Sensibilidad al coste del agua	85
VI.3.2. Sensibilidad al coste de la escorrentía	86
VI.3.3. Sensibilidad al coste de la percolación	86
 CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	 91
 BIBLIOGRAFÍA	 95
 ANEXOS	 103
Anexo 1: Datos experimentales de campo	105
1. Datos de la sección del surco	105
2. Ensayos de infiltración	106
Anexo 2: Organigrama general del modelo	107
1. Simbología empleada en el organigrama	107
2. Organigrama general del modelo	108
Anexo 3: Manual de OPTIMEC	109

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

La razón de ser del riego es proveer el agua que conviene al desarrollo del cultivo y a la conservación del suelo. Con la práctica del riego, el agricultor trata de aumentar la productividad de los cultivos con objeto de ver aumentadas sus ganancias. Es fácil intuir, por tanto, que dicha práctica está sumida principalmente en un entorno económico.

En la actualidad, se riega aproximadamente el 20 por ciento del total de las tierras cultivadas en el mundo, alrededor de mil millones de hectáreas (Israelsen y col., 1980), siendo el riego por superficie el método más común con diferencia. En España, los riegos por superficie suponen un 80 por ciento aproximado del área regada (Camacho, 1993), y en Andalucía siguen predominando los regadíos tradicionales aunque la cifra desciende hasta un 56 por ciento del área regada (Getisa, 1992).

Todos los riegos por superficie son, en principio, de escasas necesidades energéticas. Este factor es, a veces, definitivo en el análisis económico previo a la puesta en riego y quizás ayude a explicar por qué otros métodos más modernos no han logrado desplazarlos.

Se presenta, por tanto, como un objetivo fundamental la determinación de las variables de manejo, lámina de agua requerida y módulo de aplicación, óptimas desde un punto de vista económico. Con ello se aumentará el beneficio de la explotación mediante un uso más eficiente del agua. Asimismo, la valoración de las pérdidas de agua mediante percolación profunda y escorrentía permitirá un desarrollo sostenido y sostenible con el medio ambiente.

Como hipótesis de partida no se cuenta con valores preestablecidos ni de intervalo de riego, ni de lámina de riego, ni módulo de aplicación. Se trata de determinar estas variables mediante el uso conjunto de tres submodelos (uno para el balance de humedad del suelo, otro para la hidráulica del riego y otro para estimar la producción del cultivo) y un módulo de optimización económica en el que se emplearan los algoritmos genéticos.

Este enfoque sería inabordable si no contásemos con la ayuda del ordenador. Por tanto, para determinar las variables de manejo óptimas tendremos que realizar un programa de ordenador. Éste debe encargarse de generar aleatoriamente parejas de valores de lámina de riego y módulo de aplicación para cada día de riego durante la campaña y, al mismo tiempo, debe ir seleccionando las mejores combinaciones basándose en unas funciones de mérito.

Para desarrollar la aplicación informática se han empleado conjuntamente los programas *Access*, del paquete Microsoft para Windows, y *Visual Basic 5.0*.

I.1. Generalidades sobre el riego por superficie

La puesta en riego por superficie de una parcela requiere la sistematización de la misma. Este término incluye al conjunto de obras necesarias para hacer posible la explotación apropiada del regadío, como la ejecución de redes de conducción, distribución y avenamiento, la instalación de obras mecánicas complementarias y la explanación y corte de los tablares o canteros de riego (Losada, 1992). En definitiva, los riegos por superficie requieren la división de la parcela en canteros que serán la parte terminal del sistema de distribución, conduciendo, almacenando y dejando infiltrar el agua servida en cabecera.

Una primera clasificación de los riegos por superficie se hace en función de la pendiente de los canteros. Cuando ésta es nula, tablas a nivel, el avance del agua hacia la cola del cantero es debido exclusivamente a la pendiente motriz del perfil de flujo. Por el contrario, cuando los canteros tienen cierta pendiente, tablas en declive, ésta también ayuda al movimiento de avance del agua.

A continuación se resumen las ventajas y desventajas del riego por superficie. Como ventajas:

- ☐ No necesita equipos caros ni complicados.
- ☐ No requiere mano de obra especializada.
- ☐ Requiere una mínima inversión de capital (excepto cuando la distancia entre el suministro de agua y la parcela es muy grande).
- ☐ Los costes de operación y mantenimiento suelen ser bajos.
- ☐ El viento, como variable climática, no incide apreciablemente en una buena aplicación del riego.

Como desventajas tenemos que:

- ☐ Tiene mayor necesidad de mano de obra que los métodos a presión.
- ☐ Para conseguir un buen rendimiento de aplicación es necesario que las parcelas estén bien sistematizadas. El coste de sistematización es alto.
- ☐ El rendimiento de aplicación es muy sensible a las variables de manejo.
- ☐ El avance del agua está muy condicionado por la superficie del terreno y sus características de infiltración. Esto conduce a una menor uniformidad en la aplicación. Por ejemplo, en tierras bajas y con suelos de infiltración lenta suelen existir problemas de inundación y salinidad.

I.2. Riego por surcos de escurrimiento

Es aquel que tiene lugar en surcos con pendiente. El presente trabajo versará sobre este tipo de riego por lo que, de ahora en adelante, nos referiremos exclusivamente a él.

El método por surcos representa la aplicación natural del agua de riego a los cultivos en línea (maíz, algodón, tomates, remolachas, lechugas, etc.), especialmente cuando han sido cubiertos por bandas de plástico (fresas, melones, etc.). El riego convencional por escurrimiento en surcos tiene características propias muy diferenciadas. Conviene destacar los aspectos que siguen:

- El agua avanza por la base del surco, mientras que los cultivos (generalmente en línea) se desarrollan sobre los lomos. La solera suele estar desprovista de vegetación, y la velocidad de avance del agua queda siempre limitada por un cierto riesgo de erosión.
- La infiltración es bidimensional y afecta a una fracción de superficie de suelo relativamente pequeña. La filtración de agua hacia la zona ocupada por las raíces ha de tener una componente lateral importante, teniendo mayor repercusión cuando el crecimiento de las mismas es aún escaso. Dicha filtración puede mantenerse gracias al sumando matricial del gradiente de potencial en subsaturación, por lo que es preciso que el tamaño de los poros se distribuya equilibradamente. Si son demasiado grandes, la acción de la gravedad dará lugar a una filtración excesivamente vertical; si son demasiado pequeños, la filtración puede ser muy lenta.
- La capacidad relativamente pequeña de la sección del surco y su radio hidráulico pequeño implican la tendencia a que el avance sea lento y el receso breve.
- El módulo que un surco es capaz de conducir no puede superar al gasto que corresponde a su sección y a su pendiente, ambas relativamente pequeñas. Por este motivo y el riesgo de erosión mencionado anteriormente, el módulo a derivar en la cabeza de cada surco deberá ser siempre pequeño, normalmente comprendido entre 0,5 y 3 l/s.

La limitación más acusada para aplicar el riego por surcos se presenta cuando el agua o el suelo es de carácter salino, ya que las sales tienden a acumularse en los lomos.

I.3. Rentabilidad económica del agua de riego

En la cuenca del Guadalquivir, la rentabilidad económica general del uso del agua es mucho menor a la de los regadíos del litoral andaluz, 44 ptas/m³ frente a 146 ptas/m³, (Reca, 1997). Las causas posibles de esta baja rentabilidad son:

- ☐ Excedentes de la mayor parte de productos agrícolas.
- ☐ Directrices no productivas de la P.A.C.
- ☐ Deficiente administración del agua.

Además, los sistemas de riego tradicionales:

- ☐ Generan mayor volumen de pérdidas en distribución y tienen menor control sobre el agua.
- ☐ Suelen darse en parcelas deficientemente sistematizadas.
- ☐ Suelen tener un manejo inadecuado que se debe a la falta de asesoramiento y preparación técnica y a la falta de control en la aplicación.

Capítulo II

ANTECEDENTES

II. ANTECEDENTES

II.1. Modelos hidráulicos de riego por superficie

En los últimos años ha tenido un gran auge la elaboración de modelos de simulación del riego por superficie. Dichos modelos se han basado, bien en las ecuaciones de balance de volumen, bien en las ecuaciones de Saint-Venant.

El balance volumétrico aplica el principio de conservación de la materia. Iguala la aportación aplicada desde que comienza el riego con el volumen de escurrimiento que cubre el suelo, o volumen superficial, más el infiltrado.

Rayej y col. (1987) desarrollan un modelo hidráulico de balance de volumen que puede adaptarse a funciones de infiltración variable. Éstas se ajustan a datos de campo tomados a intervalos determinados a lo largo del surco. Para determinar el volumen superficial se emplea un factor de forma de flujo superficial que se considera constante ($\sigma_y = 0.77$). El volumen infiltrado se calcula con los datos de infiltración de los puntos de control a lo largo del surco.

Reddy (1994), para optimizar los parámetros de diseño del riego por surcos, emplea un sencillo modelo de balance volumétrico en el que no considera la fase de receso ni los factores de forma del flujo. Para estimar el volumen de escurrimiento emplea las ecuaciones del SCS, donde la lámina infiltrada media se calcula mediante aproximación lineal, en lugar de integrar la función de avance a lo largo del surco.

Camacho y col. (1998 b), basándose en los trabajos de Valiantzas (1997) y de Camacho y col. (1997), presenta un método aplicable al diseño y evaluación de surcos con pendiente y escurrimiento libre. En este caso, la ecuación de balance de volumen se presenta con los dos factores de perfil de forma variables con el tiempo, uno para el flujo superficial y otro para el subsuperficial.

Por su parte, las ecuaciones de Saint-Venant son el resultado de conjugar las ecuaciones de continuidad y dinámica del movimiento y son la base de los modelos hidrodinámicos. Éstos pueden adoptar distintas formas según las simplificaciones que se realicen. Mientras que los *modelos hidrodinámicos completos* resuelven la ecuación de cantidad de movimiento completa (Katapodes y col., 1977), los de *inercia nula* desprecian la inercia y los términos de aceleración en esta ecuación (Strelkoff y col., 1977). Por último, los *modelos de onda cinemática* desprecian además los términos de gradiente de presión (Woolhiser y col., 1967; Chen, 1970).

Estos modelos se han implementado en programas de ordenador que permiten simular la aplicación de distintas técnicas de riego por superficie. Algunos se han comercializado, por ejemplo: BRDRFLW, SIRMOD, SRFR y B2D.

II.2. Modelos de balance hídrico del suelo

Jensen, y col. (1971) proponen un modelo para estimar el déficit de humedad del suelo a partir de datos climáticos, de cultivo y de suelo. El balance de humedad se hace diariamente según la ecuación siguiente:

$$SMD = \sum_{i=1}^n (ET - R_e - I + DP) \quad (2.1)$$

donde *SMD* es déficit de humedad del suelo (después de un abundante riego *SMD* = 0); *ET* es la evapotranspiración, *R_e* la precipitación efectiva, *I* el riego aplicado, *DP* el drenaje desde la zona radicular e *i* es uno para el primer día después de un riego abundante.

Raghuwanshi y Wallender (1994 y 1997) emplean la ecuación de balance anterior pero difieren en el cálculo de sus componentes, principalmente en la *ET*, y además la aplican a un suelo no uniforme. Las ecuaciones de cálculo serán detalladas más adelante.

II.3. Modelos de optimización: Función objetivo y función de producción

La investigación sobre optimización del diseño de riego por superficie ha sido bastante escasa hasta los años ochenta. Los trabajos de Marjai y col.(1958), Wu y col. (1970) y Nugteren (1973) se limitan a optimizar una sola variable. Marjai y col. (1958) consideran como objetivo el humedecimiento uniforme de toda la longitud del surco, y deducen ecuaciones teóricas para conseguir el módulo de aplicación óptimo bajo un conjunto dado de condiciones de campo. A continuación, los resultados teóricos fueron corroborados por los experimentales. Wu y col. (1970) consideran la longitud del surco como única variable a optimizar y desarrollan una función de costes basándose en la misma, suponiendo que las restantes variables del sistema son constantes. Por su parte, Nugteren (1973) aplica el cálculo diferencial para optimizar diferentes variables manteniendo todas las restantes como constantes.

La optimización matemática del diseño de sistemas de riego por surcos no era posible hasta hace relativamente poco, los años setenta, por dos razones principales. En primer lugar no se contaba con ecuaciones matemáticas apropiadas para expresar las relaciones entre las variables del sistema y la variable a optimizar. Ni siquiera se disponía de ecuaciones empíricas. En segundo lugar, la teoría sobre optimización matemática era demasiado limitada para tratar problemas de este tipo.

Reddy y Clyma (1981) emplean la programación no lineal y el diseño propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos para sistemas de riego por surcos, para obtener un diseño óptimo, considerando una serie de variables de diseño y condicionantes del sistema,

con el objetivo de minimizar el coste de implantación del mismo. Las funciones objetivo que se toman normalmente son, o bien la maximización del beneficio, o bien la minimización del coste. Para un sistema de riego, maximizar el beneficio requiere una relación explícita entre las variables de diseño del sistema y el rendimiento de los cultivos. Reddy y Clyma (1981) minimizan una función de costes que tiene en cuenta el agua, la mano de obra y la construcción de los lomos.

Holzapfel y col. (1986) toman como función objetivo maximizar el beneficio. Sus modelos, para riego a manta y por surcos, tienen funciones objetivo y restricciones no lineales que son linealizadas para ser tratadas por medio de la programación lineal. Consideran el coste del agua y la mano de obra. Su estudio lo llevan a cabo en California y en Chile, por lo que los coeficientes de las ecuaciones respectivas difieren ligeramente. Para obtener el rendimiento emplean una función de producción lineal con respecto a la evapotranspiración estacional.

Yitayew y col. (1985), en un estudio de optimización del uso del agua en el riego por surcos, emplean como función de producción de cultivo (maíz) la propuesta por Letey y col. (1984). Se asume una relación lineal entre el rendimiento y el agua infiltrada hasta que se alcanza el rendimiento máximo, después del cual éste permanece constante aunque haya una lámina de agua infiltrada mayor.

Holzapfel y col. (1987) desarrollan y analizan modelos de optimización no lineales (básico y ampliado) para el diseño y manejo de los métodos de riego por superficie, comparando sus resultados con el modelo de optimización lineal que habían desarrollado en Holzapfel y col. (1986). Llegan a la conclusión de que el modelo no lineal ampliado es más flexible en cuanto a cambios en la función objetivo o incluir otros costes. Además, dicho modelo ofrecía una mejor representación de los parámetros económicos en la función objetivo.

Hasta Wallender y col. (1987) la optimización económica para riego por surcos se había limitado al supuesto de suelo uniforme. Estos autores toman una serie de puntos a lo largo del surco, en los que miden la infiltración. Maximizan el beneficio en función del rendimiento medio obtenido y el coste del agua de riego. Su función de producción relaciona el rendimiento con la lámina infiltrada media y también tiene en cuenta el coeficiente de uniformidad de Christiansen. Para optimizar emplean una técnica de búsqueda secuencial (Kuester y col., 1973).

Reddy (1994), amplía el método de diseño óptimo desarrollado por Reddy y Clyma (1981, 1983) y Reddy y Apolayo (1991) para el diseño de sistemas de riego por surcos considerando limitaciones en cuanto a cantidad del agua de escorrentía y percolación. Plantea el problema de diseño con vistas a maximizar el beneficio del sistema, así como minimizar los efectos indeseables que se derivan del mismo. Su modelo estima el rendimiento del cultivo en función del *rendimiento de almacenamiento*, E_r , que se define como la relación porcentual entre el volumen de agua almacenada en la zona radicular y el volumen de agua requerido en dicha zona. El resultado del ajuste matemático de los datos

empíricos es una función de rendimiento cuadrática. Además, Reddy obtiene una relación entre E_r y las variables de diseño del sistema (módulo de aplicación, tiempo de aplicación, longitud del surco y lámina neta aplicada).

Wallender y col. (1990) buscan combinaciones de módulo y tiempo de aplicación que maximicen el beneficio para una serie de calidades de agua en suelos uniformes y no uniformes. En la función de beneficio penalizan las pérdidas por percolación profunda y por escorrentía. Como función de producción adoptan la función cuadrática desarrollada por Letey y col. (1986), que tiene en cuenta la conductividad eléctrica y la lámina aplicada.

Raghuwanshi y col. (1997) también tienen en cuenta el coste de la escorrentía y de la percolación. Como función de producción toman una de tipo lineal que depende de la relación entre la evapotranspiración actual y la evapotranspiración máxima, teniendo en cuenta un coeficiente de respuesta productiva del cultivo y su rendimiento máximo o potencial. Estas funciones de producción fueron deducidas a partir de resultados experimentales por Stewart y Hagan (1973). Los cultivos, en sus distintas fases de desarrollo, presentan distinta sensibilidad al estrés hídrico (Doorenbos y Kassam, 1979). El problema de las funciones lineales es que no tienen en cuenta el momento de aplicación del agua. Por esta razón, es más aconsejable la forma multiplicativa (Smith, 1990), que requiere un coeficiente de respuesta productiva para cada estado de desarrollo. Varios autores han comprobado que se adapta bien a las situaciones reales observadas (Mantovani, 1992 a; Mannoichi y Mecarelli, 1994; De Juan y col., 1996; Tarjuelo y col., 1997; Reca, 1997). En este trabajo se estima el rendimiento productivo de los cultivos mediante la función multiplicativa propuesta por Smith (1990). Ésta se describe en el apartado V.1.3.

Nagaraju Kumar y col. (1998) desarrollan un modelo de programación no lineal para riego por superficie deficitario. Utilizan como función de producción de tipo multiplicativo la propuesta por Jensen (1968):

II.4. Optimización mediante algoritmos genéticos

Bajo el término "*algoritmos genéticos*", se agrupan una serie de procedimientos numéricos diseñados para obtener el máximo (o mínimo) de una función sin restricciones mediante procesos de selección y azar (Goldberg, 1989).

Su desarrollo se inicia en el campo de la bioquímica en los años sesenta para realizar simulaciones genéticas con computadoras digitales. Desde entonces, empiezan a surgir trabajos en torno a los algoritmos genéticos, pero es John Holland quien en 1975 integra y elabora sus dos fundamentos básicos: la capacidad de una representación simple (en forma de cadena de bits) para mostrar estructuras complejas y la potencia para mejorar dichas estructuras por medio de simples transformaciones.

Los algoritmos genéticos han sido aplicados a un gran número de problemas de optimización y de inteligencia artificial (Goldberg, 1989). Su aplicación en ingeniería, para el diseño de estructuras resistentes con el mínimo peso, se debe a los trabajos de este último autor. Galante (1993) también emplea algoritmos genéticos en el campo del cálculo de estructuras y Wang (1991) los emplea para la calibración de parámetros en modelos conceptuales de lluvia-escorrentía. Los algoritmos genéticos también han sido aplicados a la optimización de redes de distribución de agua, demostrando su capacidad para obtener soluciones mejores que las que proporcionan los métodos clásicos (Montesinos, 1995; Dandy y col., 1996; Montesinos y col., 1997). Básicamente, el objetivo de estos trabajos es ajustar al mínimo los diámetros de las conducciones para abaratar el coste de las mismas.

Giménez (1996) aplica los algoritmos genéticos al campo de los riegos calculando las variables de manejo, a escoger entre el módulo de aplicación, el factor de recorte y la lámina requerida, para hacer máximo el rendimiento de aplicación de una operación de riego concreta.

Una vez analizada la naturaleza de los algoritmos genéticos, su comportamiento en trabajos anteriores y las características del problema que se plantea en éste, se ha considerado apropiado su empleo como método de optimización del beneficio obtenido en el riego por surcos de escorrentía libre.

Capítulo III

OBJETIVOS

III. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es *determinar las variables de manejo, lámina requerida, H_r , y módulo de aplicación, q , óptimas desde un punto de vista económico y medioambiental*. Al tratarse de un modelo de riego estacional, el objetivo será determinar la H_r y q óptimas y la fecha de cada riego a lo largo de la campaña. Lo que se pretende es aumentar el beneficio de la explotación mediante un uso más eficiente del agua y manteniendo un desarrollo sostenible con el medio ambiente. Este planteamiento supone que, en función de una serie de costes asociados al riego (energía, y mano de obra principalmente) y del precio esperado de la cosecha, interesará regar más o menos y en una fecha u otra dependiendo de la sensibilidad del cultivo al déficit hídrico.

Como hipótesis de partida se toma la unidad semanal como intervalo mínimo de riego y los valores de lámina requerida y módulo de aplicación estarán comprendidos entre unos límites mínimo y máximo, teniendo una variación discreta. Se trata de determinar estas variables mediante el uso conjunto de tres submodelos que debemos desarrollar; éstos constituyen tres objetivos secundarios necesarios para conseguir el objetivo principal descrito anteriormente:

- En primer lugar, se requiere un *modelo de balance de humedad del suelo* para estimar diariamente el déficit de humedad del suelo y la evapotranspiración del cultivo.
- En segundo lugar, es necesario un *modelo hidráulico del riego* que permita conocer el desarrollo del mismo y evaluar su coste y calidad en función de diversos parámetros de comportamiento
- En tercer lugar, un *modelo de producción del cultivo*, ya que es fundamental la estimación del desarrollo del cultivo y la predicción de su respuesta en el rendimiento final de cosecha.
- Por último, para determinar la combinación óptima de riegos (aquella que maximiza el beneficio neto) se desarrolla un *módulo de optimización económica*. El uso de los algoritmos genéticos ayudará a buscar la solución óptima entre los miles de millones de combinaciones posibles.

Para poder abordar el problema se elaborará un programa informático en *Visual Basic* que recoja todos los cálculos de los submodelos y almacene los resultados del proceso de optimización en un fichero de base de datos. Dichos resultados podrán ser consultados mediante el programa *Access*.

Capítulo IV

MATERIAL

IV. MATERIAL

IV.1. Determinación de la pendiente de los surcos

Para el cálculo de la pendiente de los surcos se ha levantado un itinerario altimétrico abierto por el método del punto medio.

Material

- ☐ 1 nivel
- ☐ 1 mira y un trípode
- ☐ Impresos de campo

Trabajo de campo

Consiste en ir situando la mira y estacionando el nivel en puntos distribuidos aproximadamente sobre el eje longitudinal de la finca, ya que ésta es la dirección que tienen los surcos.

La nivelación geométrica del punto medio consiste en estacionar el nivel aproximadamente en el medio de las posiciones de las miras y de modo que cada eje sea una línea recta. En esta situación se realizan las lecturas de mira correspondientes a los tres hilos del retículo, comprobando que la central sea la semisuma de las extremas, tanto en la visual de espalda como en la de frente (Sánchez de la Orden, 1992). Empezamos en un extremo de la finca y nos vamos desplazando longitudinalmente hasta llegar al otro. Como el día que se realizó la medición la visibilidad era buena, fuimos situando la mira de modo que la distancia al nivel fuese unos 75 pasos.

Trabajo de gabinete

Consta del cálculo de los desniveles parciales en función de los datos de las visuales de cada eje. La longitud (L) de cada visual se obtiene mediante la expresión:

$$L = K \cdot (H_s - H_i) \quad (4.1)$$

siendo K la constante diastimométrica del nivel, H_s y H_i son respectivamente las lecturas correspondientes a las líneas superior e inferior del retículo.

Obviamente, la longitud de cada eje será la suma de las longitudes correspondientes a la visual de espalda y a la de frente. En el Cuadro 1 se han recogido solamente los datos necesarios para calcular la pendiente, es decir, la lectura central de cada visual y la longitud de cada eje, ambas expresadas en metros.

Cuadro 1
Datos para el cálculo de la pendiente

Eje	V.Espalda (m)	V.Frente (m)	Longitud (m)	Pendiente (%)
1-2	1,670	1,475	130,2	0,15
2-3	1,795	1,344	121,8	0,37
3-4	1,810	1,366	126,9	0,35
4-5	1,764	1,256	127,1	0,40
5-6	1,852	1,450	104,4	0,38
6-7	1,680	1,532	98,6	0,15
7-8	1,714	1,445	118,0	0,23
8-9	1,550	1,400	126,5	0,12
9-10	1,443	1,365	155,7	0,5

Fuente: Elaboración propia.

En este trabajo no consideramos el supuesto de surcos con pendiente variable. Ponderando la pendiente de cada eje con la longitud del mismo obtenemos una pendiente media de 0,24 por ciento, que tomamos como referencia para la pendiente de los surcos de nuestra parcela.

IV.2.Determinación de la infiltración

La infiltración es uno de los parámetros más difíciles de definir con precisión. Su importancia, junto a las dificultades de obtener datos fiables, nos sugiere que deberíamos dedicar bastante tiempo para asegurarnos una estimación adecuada. En nuestro caso, hemos realizado cuatro ensayos de *infiltración en cilindro*, siendo éste el método más común para determinar la infiltración en campo. Los dos primeros tuvieron lugar el 10 de Marzo y los dos restantes el 22 de Mayo de este año.

Material

- ❑ 2 infiltrómetros cilíndricos de chapa, con diámetro de 0,28 m, espesor 4 mm y altura 0,30 m y dos cilindros con diámetro de 0,60 m e iguales características.
- ❑ Regla de 0,3 m de longitud.
- ❑ Cronómetro.
- ❑ Impresos de campo para registro de datos.

- ❑ Varios: tapa y maza para clavar los infiltrómetros, recipientes para el agua de con suficiente capacidad (15 l) y nivel de albañil.

Trabajo de campo

El procedimiento para instalar los infiltrómetros comienza por examinar y seleccionar los posibles emplazamientos. Hay que evitar los sitios con alguna irregularidad superficial inusual, con madrigueras de animales o con piedras que puedan dañar el cilindro. También hay que descartar las zonas compactadas por el paso de animales o maquinaria.

Para poder llevar a cabo los dos ensayos simultáneamente elegimos dos sitios distantes cien metros aproximadamente. El proceso a seguir es descrito a continuación (Losada y col., 1992):

- ❑ Clavamos verticalmente los infiltrómetros hasta una profundidad de 10-15 cm, de modo que queden concéntricos y nivelados. El anillo exterior va a servir de poza y ayudará a que la componente vertical de la infiltración en el cilindro central sea mayor.
- ❑ Vertemos agua en cada sistema poza/infiltrómetro hasta lograr una carga de 10 a 15 cm y registramos el tiempo y la carga correspondientes. Para perturbar lo menos posible la superficie del suelo vertemos el agua sobre un plástico que retiraremos al poner en marcha el cronómetro.
- ❑ Registramos el nivel en el infiltrómetro. La profundidad en el cilindro central debe mantenerse entre 6 y 10 cm a lo largo de la prueba y procuraremos mantener un nivel análogo en la poza. Cuando se añade agua es necesario registrar el nivel antes y después de rellenar. Al principio los intervalos de medida serán de un minuto, e irán creciendo conforme decae la infiltración instantánea. El ensayo se da por terminado cuando vemos que ésta se estabiliza. En nuestra parcela los ensayos se prolongaron durante unas dos horas.

Trabajo de gabinete

Consiste en obtener los parámetros k y a de la ecuación de infiltración de Kostikov:

$$Z = k \cdot t^a \quad (4.2)$$

donde k y a son parámetros empíricos.

Para ello, con los datos registrados de infiltración acumulada y tiempo (*anexo 1*) realizamos un ajuste potencial (Reina, 1998). Como resultado tenemos la ecuación de la recta de

Kostiakov, donde identificamos el valor de los parámetros buscados. Tras realizar la media de las cuatro pruebas, la ecuación obtenida es:

$$Z = 1,08 \cdot t^{0,49}$$

siendo $k = 1,08 \text{ cm/min}^a$ y $a = 0,49$. Teniendo en cuenta que la separación entre surcos es 0,75 m, se puede expresar k en $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{min}^a$ multiplicando por 0,75/1000; $k = 0,00081 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{min}^a$. De este modo se obtiene la infiltración en m^3/m .

IV.3. Determinación de los parámetros geométricos del surco (ρ_1 , ρ_2)

Material:

- ☐ 2 planchas metálicas y un martillo
- ☐ Papel y cinta adhesiva
- ☐ Pintura en spray

Trabajo de campo

Consiste en obtener un perfil de la sección transversal del surco. Para ello, se coloca el papel entre las dos planchas y se pega bien con cinta adhesiva a una de ellas. A continuación se clavan las planchas en el terreno de modo que el conjunto quede perpendicular al surco. Acto seguido se levanta una de las planchas, quedando el papel al descubierto, y marcamos con el spray la sección del surco.

Trabajo de gabinete

Una vez que tenemos la sección marcada en el papel, trazamos su eje de simetría y sobre él marcamos distintos valores de calado (y). En nuestro caso la profundidad del surco era 13 cm y tomamos 13 puntos equidistantes a 1 cm. A continuación, medimos la anchura (b) del surco en dichos puntos.

Con estos valores, se calcula el área (A) y el perímetro mojado (WP) correspondiente a cada punto de calado (*anexo 1*) y, mediante sendos ajustes potenciales, se obtienen las siguientes relaciones:

$$A = \sigma_1 \cdot y^{\sigma_2} \quad WP = \gamma_1 \cdot y^{\gamma_2} \quad (4.3, 4.4)$$

donde, por identificación de parámetros, se obtiene: $\sigma_1 = 0,908$; $\sigma_2 = 1,632$; $\gamma_1 = 1,980$ y $\gamma_2 = 0,680$.

Si se emplea la aproximación empírica propuesta por Elliott y col. (1982):

$$A^2 \cdot R^{4/3} = \rho_1 \cdot A^{\rho_2} \quad (4.5)$$

donde R es el radio hidráulico en m, A es la sección transversal del surco en m^2 y ρ_1 y ρ_2 son los parámetros empíricos buscados, cuyo valor viene dado por (Camacho y col., 1997):

$$\rho_1 = \frac{\sigma_1^{10/3 - \rho_2}}{\gamma_1^{4/3}} ; \quad \rho_2 = \frac{10}{3} - \frac{4}{3} \frac{\gamma_2}{\sigma_2} \quad (4.6 \text{ a, b})$$

obteniendo: $\rho_1 = 0,381$ y $\rho_2 = 2,777$.

Capítulo V

METODOLOGÍA

V. METODOLOGÍA

V.1. Modelo Estacional de Riego por Surcos

El modelo utilizado contiene, a su vez, tres submodelos: Submodelo de humedad del suelo, de simulación hidráulica del riego y de producción del cultivo. Para el análisis de las posibles soluciones se cuenta con un módulo de optimización económica. La descripción detallada de los componentes del balance de humedad viene dada por Raghuwanshi y Wallender (1994). Por su parte, para mayor detalle sobre el modelo hidráulico de balance volumétrico el lector debe referirse a Camacho y col. (1997), Camacho y col. (1998a, 1998b) y Valiantzas (1997a, 1997b).

V.1.1. Submodelo de Humedad del Suelo

V.1.1.1. Balance de humedad

Uno de los métodos más extendidos para la programación de riegos es el balance de agua, que implica la determinación de todas las entradas y salidas de agua en la parcela, y está basado en el mantenimiento de un contenido de humedad en el suelo adecuado para el cultivo. Es especialmente importante conocer con exactitud el consumo de agua del cultivo.

En este trabajo se considera el supuesto de uniformidad del suelo. La ecuación que expresa el balance de humedad de una parcela en riego es:

$$SMD_i = SMD_{i-1} + ET_i + DP_i - H_i - R_i \quad (5.1)$$

donde SMD es el déficit de humedad del suelo en la zona radicular, y se define como la diferencia en almacenamiento entre el suelo a capacidad de campo y el contenido de agua el día i . ET es la evapotranspiración, DP es la percolación profunda, H es la lámina de riego, R la precipitación efectiva y, por último, i es el índice temporal, en días. Todos los factores se expresan en mm.

V.1.1.2. Evapotranspiración

La ET diaria es función de las condiciones climáticas, del suelo y del cultivo (Jensen y Heermann, 1970):

$$ET_i = ET_{0i} [Kc_i Ks_i + Kw(0.9 - Kc_i)] \quad (5.2)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia, en mm, que depende de las condiciones climáticas. K_c es el coeficiente de cultivo, K_s es el coeficiente de estrés del cultivo y K_w es un coeficiente de corrección de la evapotranspiración.

Para la estimación de la ET_o se han propuesto numerosos métodos. La elección de uno u otro depende sobre todo de los datos disponibles. En los últimos años se ha realizado un esfuerzo importante para la verificación de los distintos métodos. Trabajos recientes desarrollados en la Universidad y el C.I.F.A. de Córdoba han demostrado las escasas diferencias entre los siguientes métodos: Penman-FAO, Penman-Monteith, Hargreaves y FAO-Radiación.

Este modelo emplea el método de Hargreaves (Hargreaves y col., 1985), pues sólo requiere datos de temperatura y da muy buen resultado en climas semiáridos (Mantovani y col., 1992a).

$$ET_o = 0,0023 * RA * (T^{\circ}C + 17,8) * TD^{0,5} \quad (5.3)$$

en la que ET_o y RA han de tener las mismas unidades y expresan la equivalencia con agua evapotranspirada, mm/día en nuestro caso; RA es la radiación extraterrestre, $TD = T_{max} - T_{min}$, en grados Celsius, y $T^{\circ}C = (T_{max} + T_{min})/2$. ET_o se ha determinado a partir de los datos diarios de temperaturas máximas y mínimas de Córdoba recogidos por el Instituto Nacional de Meteorología. Los registros comprenden 35 años, desde 1961 hasta 1995.

Aunque la diferencia es pequeña, con objeto de tener un mayor rigor estadístico es conveniente calcular la ET_o basándose en datos reales y no en datos medios (Villalobos, 1993). Por tanto, la ET_o se ha calculado diariamente a lo largo de los 35 años de la serie y después se ha hecho la media para cada día del año.

El coeficiente de cultivo en la ecuación 5.2, K_c , es adimensional y depende del tipo de cultivo y del estado de crecimiento. K_w es un coeficiente adimensional de corrección de ET y su valor es 0,8, 0,5 y 0,3, respectivamente, para el primero, segundo y tercer día después de un suceso de lluvia o riego. Su objeto es contabilizar la evaporación desde la superficie del suelo cuando todavía el cultivo no está muy desarrollado ($K_c < 0,9$). El segundo término de la ecuación 5.2 se iguala a cero para $K_c > 0,9$ y también para un periodo mayor al tercer día siguiente al riego o lluvia. El último término por definir de la ecuación 5.2 es el coeficiente de estrés del cultivo K_s , también adimensional. Se calcula usando la siguiente expresión logarítmica (Jensen y col., 1971):

$$K_{s_i} = \frac{\log \left[1 + 100 \left(1 - \frac{SMD_{i-1}}{AWC_i} \right) \right]}{\log 101} \quad (5.4)$$

donde AWC es la capacidad de almacenamiento de humedad en la zona radicular y se define a continuación. Podemos apreciar que $K_s = 1$ cuando $SMD = 0$ y la evapotranspiración será máxima. Por el contrario, $K_s = 0$ cuando $SMD = AWC$ y la evapotranspiración será nula.

$$AWC_i = \frac{CC - PMP}{100} RD_i \quad (5.5)$$

siendo CC y PMP el contenido de humedad volumétrica del suelo a Capacidad de Campo y en el Punto de Marchitez Permanente respectivamente, en tanto por ciento. RD es la profundidad radicular.

V.1.1.3. Profundidad radicular

En el contexto de la programación de riegos es entendida como la profundidad hasta la cual se produce extracción de agua por las raíces de forma significativa. Esta profundidad es constante para cultivos permanentes (alfalfa, frutales adultos) y variable para cultivos anuales, creciendo a lo largo del ciclo hasta alcanzar un valor máximo que depende del cultivo y del suelo. La variación de la profundidad radicular para cultivos anuales se puede determinar de forma aproximada mediante el siguiente modelo de crecimiento radicular lineal con el tiempo (Kincaid y Heermann, 1974):

$$RD_i = \frac{T}{T_{ef}} (RD_{max} - RD_{min}) + RD_{min} \quad \text{cuando } T < T_{ef} \quad (5.6 \text{ a})$$

y

$$RD_i = RD_{max} \quad \text{cuando } T \geq T_{ef} \quad (5.6 \text{ b})$$

donde T es número de días tras la siembra, T_{ef} es el número de días para alcanzar la profundidad radicular máxima y suele corresponder al momento en que se alcanza la cobertura total. RD_{min} y RD_{max} es la profundidad radicular mínima y máxima en mm, respectivamente. La RD_{min} corresponde aproximadamente a la profundidad de siembra (10 – 15 cm).

V.1.1.4. Percolación profunda

Se asume que sólo ocurre percolación profunda cuando la humedad del suelo supera a la que hay cuando éste se encuentra a capacidad de campo. En este caso, la suma de la lámina de riego y la precipitación efectiva superan a la suma de la evapotranspiración y el déficit de humedad del suelo del día anterior:

$$DP_i = H_i + R_i - SMD_{i-1} - ET_i \quad \text{cuando } H_i + R_i > SMD_{i-1} + ET_i \quad (5.7 \text{ a})$$

En caso contrario no hay percolación:

$$DP_i = 0 \quad \text{cuando } H_i + R_i \leq SMD_{i-1} + ET_i \quad (5.7 \text{ b})$$

Para simular la distribución del agua en superficie (avance y receso), así como la del agua infiltrada, se emplea el modelo hidráulico descrito en el apartado V.1.2.

V.1.1.5. Criterio de riego

En primer lugar, se define agua útil, AU , como la cantidad total de agua que puede extraer el cultivo del suelo sin que se reduzca la evapotranspiración. El agua útil se puede calcular como:

$$AU_i = AWC_i \cdot NAP_i \quad (5.8)$$

donde NAP es el Nivel de Agotamiento Permisible y se expresa como fracción del intervalo de humedad disponible. Indica qué fracción del agua retenida por el suelo es utilizable por la planta sin que se reduzca la evapotranspiración.

Según algunos autores el NAP varía en función del cultivo, de la fase de desarrollo, del suelo y de la demanda evaporativa. Para su cálculo diario se emplea la siguiente expresión (recomendación de F.A.O.):

$$NAP_i = \frac{A}{B + ET_i} \quad (5.9)$$

siendo A y B coeficientes que dependen del tipo de cultivo. $A = 5,66$ y $B = 4,28$ para los siguientes cultivos: maíz, algodón, sorgo, remolacha, tabaco, soja, viña y olivo.

La aplicación informática desarrollada en este trabajo, recoge los siguientes criterios para definir la fecha de riego:

- a) Regar, con una lámina y caudal determinados, cuando el déficit de humedad del suelo iguale o supere al agua útil.
- b) Regar, con una lámina y caudal determinados, cuando el déficit de humedad del suelo iguale o supere un límite determinado.
- c) Regar, con una lámina y caudal determinados, según un intervalo de tiempo fijo
- d) Regar aleatoriamente según un intervalo semanal. La lámina y el caudal también serán aleatorios, tomando unos valores discretos comprendidos entre unos límites mínimos y máximos. Esta es la opción que se sigue en el proceso de optimización económica por medio del algoritmo genético descrito en el apartado V.2.

V.1.2. Submodelo Hidráulico de Riego por Surcos

El método que aquí se presenta es aplicable al diseño y evaluación de surcos con pendiente y escorrentía libre. Está basado en los trabajos de Camacho y col.(1997), Camacho y col.(1998a, 1998b) y Valiantzas (1997a, 1997b).

V.1.2.1. Ecuación de balance de volumen

La ecuación de balance de volumen aplicada a un surco se puede expresar como sigue:

$$Q_0 t = \sigma_y(t) A_0 x + \sigma_z(t) Z_0 x \quad (5.10)$$

donde:

- Q_0 = caudal entrante, en m^3/s
 t = tiempo desde el inicio del riego, en segundos.
 A_0 = área correspondiente al caudal de entrada, en m^2 .
 Z_0 = área infiltrada a la entrada, en m^3/m .
 X = distancia de avance, en m.
 σ_y, σ_z = factores de forma del perfil de flujo superficial y subsuperficial, respectivamente.

$$\sigma_y = \frac{\int_0^x A(s,t) ds}{x \cdot A_0} \quad \sigma_z = \frac{\int_0^x z ds}{x \cdot Z_0} \quad (5.11 \text{ a,b})$$

Estos factores son adimensionales y, aunque en los modelos tradicionales se consideran constantes, pueden variar con el tiempo según se aprecia en los gráficos siguientes (Camacho y col., 1998a). Valiantzas (1997a, 1997b) determina esta variación a partir de un modelo de onda cinemática. Resolviendo dicho modelo para variables adimensionales se pueden obtener diagramas como el del gráfico 1 para el factor de forma de almacenamiento superficial y como el del gráfico 2 para el factor de forma de almacenamiento subsuperficial (t^* es el tiempo adimensional).

A_0 , según la ecuación de Manning será:

$$A_0 = \left[\frac{Q_0^2 * n^2}{S_0 * \rho_1} \right]^{1/\rho_2} \quad (5.12)$$

siendo ρ_1 y ρ_2 parámetros empíricos relacionados con la forma del surco:

$$A^2 R^{4/3} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (5.13)$$

donde A es el área de la sección del surco y R es el radio hidráulico de la misma.

El parámetro p_2 define la sección del surco. Para una sección triangular $p_2 = 2,666$, para una trapezoidal $p_2 = 2,658$ y $p_2 = 2,704$ en el caso de una sección parabólica.

Para estimar la infiltración se emplea la ecuación de Kostiakov (ecuación 4.2).

Gráfico 1
Factor de forma superficial

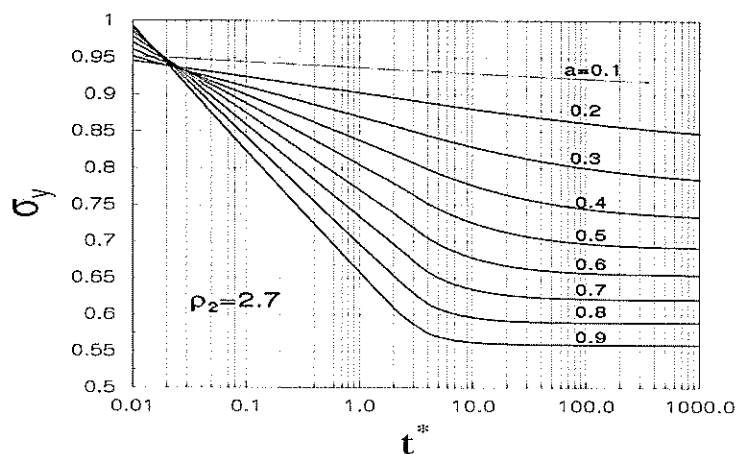
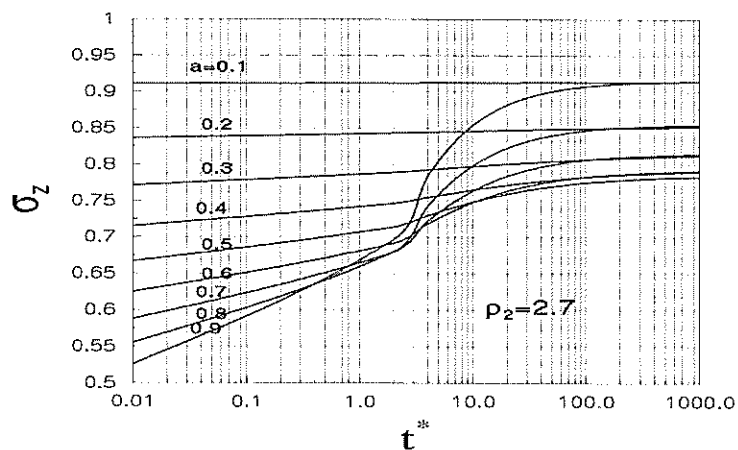


Gráfico 2
Factor de forma subsuperficial



V.1.2.2. Procedimiento de cálculo del avance superficial

La determinación de la curva de avance puede hacerse siguiendo los pasos que se describen a continuación (Camacho y col., 1998a y Valiantzas, 1997a, 1997b):

1. El valor de los factores de forma $\sigma_y(t)$ y $\sigma_z(t)$ está comprendido entre 0,5 y 1. Como punto de partida consideramos unos valores iniciales:

$$\sigma_{y0} = 0,77 \quad ; \quad \sigma_{z0} = (R_0 + R_1)/2 \quad (5.14)$$

donde

$$R_0 = \frac{1}{1+a} \quad (5.15) \quad R_1 = \frac{a\pi(1-a)}{\sin(a\pi)} \quad (5.16)$$

2. Cálculo de la distancia de avance usando la ecuación 5.10:

$$x_i = \frac{Q_0 t}{\sigma_{yi} A_0 + \sigma_{zi} z_0(t)} \quad (5.17)$$

Para cada valor de t obtenemos un valor de x . Como condición límite $x \leq$ longitud del surco.

3. Calcular los nuevos valores de $\sigma_y(t)$ y $\sigma_z(t)$:

$$\sigma_{yi+1} = v(1 - \sigma_{ymin}) + \sigma_{ymin} \quad (5.18)$$

$$\sigma_{zi+1} = R_1 + (R_0 - R_1) \cdot S \quad (5.19)$$

donde:

$$v = \left(\frac{\sigma_{yi} x_i A_0}{Q_0 t} \right)^{1+a} \quad (5.20)$$

$$\sigma_{ymin} = 0,8 + 0,055 \rho_2^{1,3} - 0,47 a^{0,6} \quad (5.21)$$

$$S = 2,7 W^2 - 1,7 W^{3,2} \quad (5.22)$$

siendo

$$W = \left(\frac{\sigma_{yi} x_i A_0}{Q_0 t} \right)^{\frac{1}{1+a}} \quad (5.23)$$

4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que la diferencia de dos valores consecutivos de x llegue a ser muy pequeña, es decir, dado un tiempo t , probamos hasta que $|x_{i+1}-x_i| < 0,1\text{m}$.

El tiempo de avance que corresponde a $x = L$, t_L , es el tiempo que tarda el agua en llegar al final del surco.

V.1.2.3. Procedimiento de cálculo del receso

Puesto que son conocidas la infiltración y la lámina requerida, podemos calcular el tiempo necesario para que se infiltre dicha lámina. Despejando en (4.2) tenemos:

$$t_{req} = \left(\frac{H_r}{k} \right)^{1/a} \quad (5.24)$$

Si consideramos que el tiempo de contacto al final del surco es el tiempo requerido y que el receso se produce de forma simultánea en todo el surco, el tiempo de corte, o tiempo de aplicación del riego, será:

$$t_{CO}' = t_L + t_{req} \quad (5.25)$$

Puesto que el receso no es simultáneo en la realidad, consideraremos que el tiempo de corte es:

$$t_{CO} = t_{CO}' - \Delta t \quad (5.26)$$

siendo

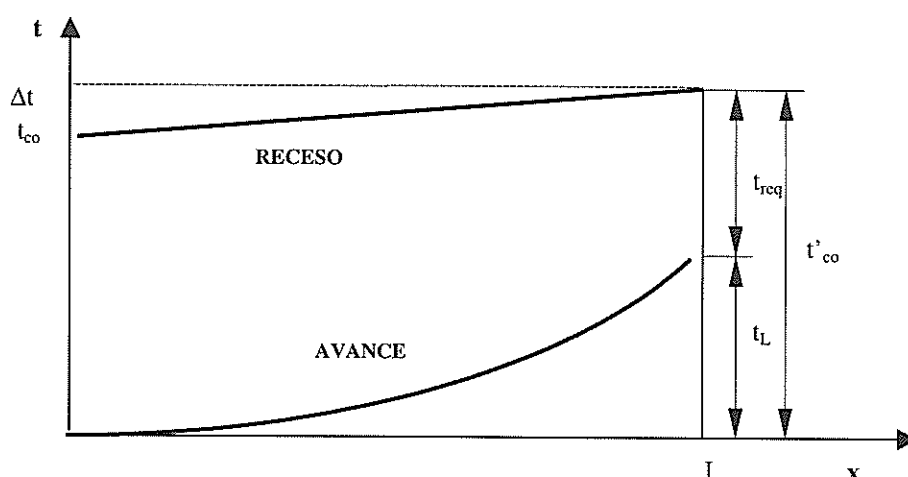
$$\Delta t = \frac{V_Y}{Q} = \frac{\sigma_Y(t_{CO}')LA_0}{Q} \quad (5.27)$$

$\sigma_Y(t')$ se obtiene como se explicó anteriormente, pasos 2 y 3, para el tiempo t_{CO}' .

Una vez que conocemos las curvas de avance y receso, podemos estimar el volumen de agua infiltrado empleando la ecuación de Kostiakov (4.2). El tiempo que tenemos que introducir se conoce como *tiempo de contacto* y se define como el tiempo durante el que tenemos agua sobre el terreno. Lo calculamos, para cada punto, como la diferencia entre el tiempo de receso y el de avance.

Para poder calcular la efectividad del riego debemos conocer las pérdidas producidas por percolación profunda y por escorrentía superficial. Estas pérdidas serán de gran utilidad en el proceso de optimización económica.

Gráfico 3
Curvas de avance y receso



V.1.2.4. Volumen de percolación

Las pérdidas por percolación profunda son normalmente inevitables en los sistemas de riego por superficie. Pueden ser reducidas pero su eliminación resulta comprometida, ya que supone aplicar menos agua de la requerida y esto conduce a un aumento del déficit. Éste es el caso de los riegos deficitarios, que pueden ser deseables en algunas situaciones.

Las pérdidas por percolación profunda pueden tener graves efectos en la calidad de los acuíferos así como en la parte del suelo ocupada por las raíces. Además de la pérdida de agua, el agua de drenaje arrastra nutrientes que dejan de estar disponibles para las plantas. Estos finalmente alcanzan la capa freática y pueden causar problemas de contaminación. El agua percolada también puede contribuir al aumento del nivel de la capa freática, con el consecuente riesgo de encharcamiento y, dependiendo de la calidad del agua, puede causar problemas de salinidad. Como consecuencia de esto, se estima que el 20 por ciento del área regada en el mundo sufre problemas de encharcamiento y salinidad (ICID, 1980).

Para calcular las pérdidas producidas por percolación, en primer lugar tenemos que dividir en intervalos la longitud del surco. Como es lógico, la precisión aumentará conforme disminuya el tamaño del intervalo.

El volumen percolado por surco, en m^3 , será:

$$VP_s = \frac{\Delta x S}{1000} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i + z_{i-1}}{2} - SMD_a \right) \quad \text{si} \quad \frac{z_i + z_{i-1}}{2} > SMD_a \quad (5.28a)$$

$$VP_s = 0 \quad \text{si} \quad \frac{z_i + z_{i-1}}{2} \leq SMD_a \quad (5.28b)$$

donde:

Δx = intervalo constante, en m.

S = separación entre surcos, en m.

z_i = lámina infiltrada en el punto i , en mm.

SMD_a = déficit de humedad del suelo del día anterior al riego, en mm.

n = número de intervalos.

Considerando que en una hectárea el número de surcos es $10.000/(L \cdot S)$, L y S en m, el volumen percolado por hectárea será:

$$VP_{ha} = \frac{10\Delta x}{L} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i + z_{i-1}}{2} - SMD_a \right) \quad (5.29)$$

V.1.2.5. Volumen de esorrentía

La esorrentía superficial se define como la lámina o volumen de agua sobrante al final del surco. En el caso de surcos con pendiente, es necesaria para poder cumplir con el requerimiento de agua al final de los mismos. En algunos casos puede ser reciclada mediante la construcción de un sistema de recogida de esorrentía. Esto implica un coste adicional del sistema. Sin embargo, este coste puede ser amortizado por el valor del agua recuperada.

Con frecuencia, el agua de esorrentía contiene partículas coloidales y otras sustancias peligrosas que hacen imposible su uso. En este caso, el diseño del sistema debería aportar las instalaciones necesarias para deshacerse de ella sin peligro para el medio ambiente. Esto aumentará el coste de la esorrentía. El aumento dependerá de la cantidad de esorrentía esperada en el sistema, pues ésta dictará la capacidad de las instalaciones. En el apartado VI.3. se realiza un análisis de sensibilidad para distintos costes del agua de esorrentía y percolación.

El volumen de esorrentía viene determinado por la diferencia entre el volumen total aplicado y el volumen infiltrado. Su valor, en m^3 , será:

$$VE_s = \frac{qt_{co}60}{1.000} - V_{INF} ; \quad VE_s \geq 0 \quad (5.30)$$

donde:

q = módulo de aplicación por surco, en l/s.

t_{co} = tiempo de corte, en min.

V_{INF} = volumen infiltrado por surco, en m^3 .

Al igual que en el caso anterior, el volumen de escorrentía por hectárea será:

$$VE_{ha} = \frac{10.000}{LS} VE_s = \frac{600qt_{co}}{LS} - \frac{10\Delta x}{L} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i + z_{i-1}}{2} \right) \quad (5.31)$$

V.1.2.6. Parámetros de calidad del riego

Con el fin de evaluar la utilización del agua en cada riego empleamos los siguientes parámetros:

□ Rendimiento de aplicación

$$R_a = \frac{H_n}{H_b} \quad (5.32)$$

Definido como la relación entre la lámina útil, H_n , y la lámina total aplicada, H_b . Un valor alto de este parámetro no implica necesariamente que el riego sea eficiente. Esto ocurre cuando la dosis H_b aplicada es muy pequeña en relación a la lámina requerida H_r , ya que el suelo afectado por las raíces almacenará prácticamente la totalidad del agua aplicada y el rendimiento de aplicación se aproximará a la unidad.

□ Coeficiente de pérdidas por filtración profunda

$$C_p = \frac{V_p}{V_T} \quad (5.34)$$

donde V_T y V_p son el volumen total aplicado y el percolado, respectivamente.

□ Coeficiente de pérdidas por escorrentía

$$C_E = \frac{V_E}{V_T} \quad (5.35)$$

siendo V_E el volumen perdido por escorrentía.

$$\text{De este modo: } R_a + C_p + C_E = 1 \quad (5.36)$$

□ Uniformidad de distribución

Se define como la relación entre la altura infiltrada mínima, H_m , y la altura infiltrada media, $\bar{H}$:

$$UD = \frac{H_m}{H} \quad (5.37)$$

V.1.3. Submodelo de Producción del Cultivo

V.1.3.1. Función de producción multiplicativa

Como medio de estimación del rendimiento productivo de los cultivos hemos tomado una función de producción de tipo multiplicativo (Smith, 1990):

$$Y = Y_{MAX} \prod_{j=1}^4 \left[1 - k_{vj} \left(1 - \frac{ET_j}{ET_{Mj}} \right) \right] \quad (5.38)$$

donde:

Y = rendimiento actual o esperado, en kg/ha

Y_{MAX} = rendimiento máximo histórico, en kg/ha

k_{vj} = coeficiente de respuesta productiva del cultivo en la fase de desarrollo j

ET_j/ET_{Mj} = cociente entre la ET esperada y la ET máxima acumuladas durante la fase de desarrollo j .

Por ejemplo, para la fase de desarrollo inicial de 30 días de duración:

$$ET_1 = \sum_{i=1}^{30} ET_i$$

La evapotranspiración diaria ET_i será calculada según la ecuación 5.2.

Por su parte, la evapotranspiración máxima tiene lugar cuando el cultivo no tiene estrés hídrico, por lo que ET_{Mi} se calcula haciendo $K_{si} = 1$ en la ecuación 5.2.

Como vemos, para poder emplear este submodelo debemos conocer el coeficiente de respuesta productiva para cada estado de desarrollo del cultivo. Por otra parte, ésta es la gran ventaja de las funciones de producción multiplicativas, pues en ellas se recoge la importancia del momento de aplicación del agua.

V.1.4. Optimización Económica

V.1.4.1. Función objetivo

El objetivo es maximizar el beneficio neto, NR , obtenido tras recoger la cosecha, una vez finalizada la campaña de riegos. Por tanto, se trata de:

$$\text{maximizar} \quad NR = Y \cdot P_c - f_c \quad (5.39)$$

donde Y es el rendimiento de cosecha esperado definido en la ecuación 5.38, P_c es el precio de venta de la cosecha en ptas/kg, y f_c es la función de costes asociados al riego.

$$f_c = \sum_{i=1}^k (V_{w_i} P_w + V_{r_i} P_r + V_{d_i} P_d + MO_i) \quad (5.40)$$

donde V_w , V_r y V_d son los volúmenes, en m^3/ha , de agua total aplicada, de escorrentía y de percolación, respectivamente. P_w , P_r y P_d son los costes, en ptas/ m^3 , del agua de riego, recogida de escorrentía y penalización por el agua percolada, respectivamente. MO es el coste de la mano de obra asociada al riego, en ptas/ha/riego; i es el número de riego y k es el número total de riegos durante la campaña.

V_w , V_r y V_d serán distintos para cada riego en función de la lámina que se aplique y del módulo con que se aplique. Así, para una lámina determinada, el uso de un módulo de aplicación alto resultará en una mayor escorrentía y en menos pérdidas por percolación profunda, y viceversa.

Como podemos observar, la ecuación 5.40 no incluye otros costes de producción (agroquímicos, labores agrícolas, recogida de la cosecha, etc.) que se consideran independientes de la campaña de riegos y, por tanto, invariables. En cualquier caso, para obtener el beneficio neto real tendrían que ser añadidos, no obstante, pueden considerarse incluidos dentro del precio de la cosecha o de la mano de obra.

V.1.4.2. Caudal máximo no erosivo

Una restricción común en los modelos de optimización es suponer que el valor del módulo de aplicación ha de estar comprendido en un intervalo, de modo que:

$$q_{min} \leq q \leq q_{max} \quad (5.41)$$

donde q_{min} es el caudal mínimo y q_{max} es el caudal máximo. Un valor normalmente recomendado para el límite inferior es $q_{min} = 0,5$ l/s. Por su parte, el límite superior corresponde al caudal máximo no erosivo, que depende fundamentalmente del valor de la pendiente y del tipo de suelo. Su determinación es de gran interés para evitar una pérdida excesiva de suelo fértil. Por esta razón, se ha realizado una revisión de fórmulas empíricas para la estimación del caudal máximo no erosivo en la parcela considerada en este trabajo. Sus datos están contenidos en el Cuadro 5, siendo el suelo de textura arcillo-limosa.

Benami y Ofen (1983) proponen unos caudales no erosivos comprendidos entre 0,5 y 2,2 l/s. Para Estados Unidos hacen la siguiente recomendación en función de la pendiente (S) en tanto por ciento:

$$Q_{max}(l/s) = \frac{0,625}{S(\%)} \quad (5.42)$$

Este tipo de ecuación ($Q_{max} = \text{coeficiente}/S$) es muy común, así James (1988), Koluvek y col.(1993) y Cuenca (1989), proponen un coeficiente 0,666, 0,633 y 0,6, respectivamente. Estos valores suponen, para una pendiente de 0,0025, un caudal máximo no erosivo comprendido entre 2,4 y 2,7 l/s.

Walker y Skogerboe (1987) tienen en cuenta además el tipo de suelo y la geometría del surco:

$$Q_{max}(m^3/min) = \left(v_{MAX}^{\rho_2} \frac{n^2}{3.600 \rho_1 S} \right)^{\frac{1}{\rho_2 - 2}} \quad (5.43)$$

siendo n el coeficiente de Manning, S la pendiente en tanto por uno, ρ_1 y ρ_2 son parámetros empíricos relacionados con la geometría del surco, y v_{max} es la velocidad máxima erosiva. Ésta está comprendida entre 8 y 10 m/min para suelos limosos y erosionables, y entre 13 y 15 m/min para suelos arcillosos y arenosos no erosionables. Según esta fórmula, q_{max} es muy sensible a la velocidad máxima erosiva, así, para un valor de 10 m/min $q_{max} = 3,2$ l/s y para un valor de 11 m/min $q_{max} = 4,5$ l/s.

Gardner y Lauritzen (1946) también tienen en cuenta el tipo de suelo y proponen:

$$Q_{max} = c * S(\%)^d \quad (5.44)$$

siendo c y d unos coeficientes empíricos que varían en función de las características del suelo. Estos autores los definen para obtener el caudal máximo en l/min o en gal/min, según vemos en el Cuadro 2.

Para un suelo del grupo II el valor de caudal máximo aconsejado es 2,1 l/s. Por tanto, en vista de la disparidad de los dos últimos métodos, en este trabajo se determina el caudal máximo no erosivo en función de la pendiente, tomando según la media de los métodos revisados un valor de 2,6 l/s.

Cuadro 2
Coefficientes para el caudal máximo no erosivo según la ecuación 5.44

Grupo	Textura	Permeabilidad del subsuelo	Profund.del estrato impermeable		c		d	Coefic. de Correlac.
			mm	in	Qm (l/m)	Qm (gal/m)		
I	Pesada	Lenta	> 914	> 36	53,5	14,1	-0,94	0,89
II	Moderadamente pesada	Moderadamente lenta	508-914	20-36	59,3	15,7	-0,55	0,72
III	Media	Lenta	508-914	20-36	36,8	9,7	-0,73	0,80
IV	Media	Moderadamente lenta	254-508	10-20	38,6	10,2	-0,7	0,73
V	Ligera	Moderadamente permeable	254-508	10-20	66,7	17,6	-0,62	0,73
VI	Muy ligera	Moderadamente rápida	< 254	< 10	39,9	10,5	-0,55	0,92

Fuente: Adaptada de Hamad y Strigham, 1978.

V.1.4.3. Determinación del precio del agua de riego

La aplicación informática desarrollada tiene en cuenta dos situaciones comunes para el regante. La primera es cuando éste tiene instalado un contador de agua en la entrada de su parcela y paga un precio determinado por cada metro cúbico que emplee. Como alternativa, se plantea la posibilidad de calcular el coste del agua de riego a partir de la energía requerida para bombearla desde un pozo u otra fuente cualquiera. Esto es lo que ocurre en nuestra parcela de referencia. En este, caso la estimación del precio es como sigue:

$$P_w = t \cdot P \cdot C_h \quad (5.45)$$

donde t es el tiempo, en horas, necesario para bombear un metro cúbico de agua, P es la potencia nominal de la bomba, en kW, y C_h es el coste horario de la energía en ptas/kWh.

$$t = \frac{1.000}{3.600Q} \quad (5.46)$$

y,

$$P = 0,736 \frac{Q\Delta h}{75\eta} \quad (5.47)$$

donde Q es el caudal nominal de la bomba, en l/s; Δh es la altura manométrica, suma del desnivel y de las pérdidas en las conducciones, en m; y η es el rendimiento de la bomba. Sustituyendo en la ecuación 5.45 tenemos:

$$P_w = \frac{2,726 \cdot 10^{-3} \Delta h * C_h}{\eta} \quad (5.48)$$

V.1.4.4. Esquema general del modelo

Independientemente del criterio de riego empleado, el proceso a seguir para obtener el beneficio neto al terminar la campaña es el siguiente:

1. Con el modelo de humedad del suelo se determinan principalmente los coeficientes necesarios para estimar la evapotranspiración del cultivo. Además se emplea para determinar la fecha de riego si el criterio adoptado para regar es cuando $SMD \geq AU$.
2. El modelo hidráulico simula distintos riegos usando valores de lámina requerida y caudal comprendidos en un intervalo determinado y variando según un incremento definido. Como resultado obtenemos el volumen de agua a aplicar y las pérdidas producidas, aparte de las curvas de avance, receso e infiltración y distintos parámetros de calidad del riego.
3. Con el modelo de producción obtenemos el rendimiento esperado del cultivo en base al rendimiento máximo histórico y la relación entre la ET_{max} (condiciones ideales) y la ET que tendrá lugar según los riegos aplicados en cada prueba.

Cuando el criterio de riego sea el especificado en la opción *d* del apartado V.1.1.5. (optimización), la búsqueda del máximo de la ecuación 5.39 la hacemos por medio de los algoritmos genéticos.

V.2. Procedimiento de optimización. Algoritmos Genéticos

En este problema, la utilización de un método clásico de optimización requeriría la obtención de una relación directa entre el beneficio y la lámina de riego y el caudal. El procedimiento a seguir sería como sigue: En primer lugar, el beneficio (5.39) se obtiene a partir del rendimiento de cosecha, a su vez función de la ET diaria (5.2), y de los costes asociados a los distintos riegos (5.40). La ET diaria depende indirectamente de la lámina aplicada en cada riego, pues ésta es un factor de la ecuación de balance de humedad del suelo (5.1) y, al influir en el valor del déficit de humedad, altera el valor del coeficiente de estrés (5.4). En cuanto al coste de los riegos, la percolación y la escorrentía están relacionadas con la lámina y el caudal pero también dependen del estado de humedad del

suelo el día anterior al riego. Por otro lado, los eventos de riego no tienen un intervalo determinado, simplemente se ha tomado un intervalo mínimo semanal, y no diario, por simplificar el problema.

En vista de la complejidad que presenta la obtención de una función que relacione el beneficio con la lámina de riego y el caudal, se ha considerado oportuno el uso de los algoritmos genéticos como procedimiento de optimización.

V.2.1. Introducción

La búsqueda del óptimo de un problema dado se realiza imitando los procedimientos de reproducción de los seres vivos: selección, cruce y mutación. En la naturaleza los individuos mejor adaptados a un determinado ambiente son los que mayor probabilidad tienen de reproducirse; los caracteres que los hacen aptos pasan a un mayor número de individuos en futuras generaciones, mientras que los caracteres poco adecuados se transmiten menos y pueden llegar a extinguirse. La variabilidad entre individuos se consigue gracias al intercambio de genes entre progenitores y a mutaciones que permiten la aparición de nuevas características.

En el presente trabajo se va a utilizar un algoritmo genético para determinar la programación óptima de una campaña de riegos maximizando la función beneficio neto, definida anteriormente (ecuación 5.39).

Este tipo de algoritmos comienza evaluando la población inicial, o conjunto de soluciones, generado de manera aleatoria. A continuación, mediante la aplicación de unas reglas de transición, los operadores genéticos de selección, cruce y mutación, se obtiene la generación siguiente. El conjunto de soluciones va mejorando con el paso de las generaciones. Los algoritmos genéticos son procedimientos fácilmente adaptables a problemas que resultan muy complejos de resolver mediante los algoritmos clásicos (métodos basados en cálculos de gradiente, programación lineal y no lineal, etc.). Éstos están diseñados para problemas continuos y toman un único punto de partida que condiciona en gran medida la solución final. Este hecho, además, plantea serias dificultades con problemas de óptimos múltiples y con funciones de derivación compleja o que sean discontinuas. Por el contrario, los algoritmos genéticos parten del análisis simultáneo de puntos del espacio de soluciones y se aproximan al óptimo global mediante unas reglas sencillas que sólo requieren la evaluación de la función objetivo en cada solución. Por otra parte, los algoritmos genéticos son procedimientos de optimización de problemas discretos, lo que obliga en problemas continuos a transformar los intervalos de definición de las variables en un conjunto de valores discretos cuyo número dependerá de la precisión adoptada (Goldberg, 1989).

La velocidad y capacidad de cálculo de los ordenadores actuales permiten realizar en un periodo de tiempo razonable la optimización de problemas con métodos del tipo algoritmo

genético, que requieren gran esfuerzo de cálculo, y que de forma manual serían inabordables.

Por tanto, para resolver un problema con un algoritmo genético debemos concretar (Galante, 1993):

1. La representación del cromosoma individual.
2. La forma de crear una población inicial.
3. Una función de mérito para evaluar la bondad de cada uno de los individuos de la población.
4. Los operadores genéticos (cruce, mutación, etc.) que alteren la composición de la población.
5. La evaluación de los parámetros de control (tamaño de la población, probabilidad de reproducción, etc.).

V.2.2. Representación de soluciones

Los términos utilizados para describir a un ser vivo pueden adaptarse para describir los elementos de un problema de optimización. Un *individuo* I , será un conjunto de valores numéricos definidos $x_1, x_2, \dots, x_n$ de cada una de las variables de decisión, constituyendo una posible solución. La concatenación de los valores numéricos de las variables que forman el individuo compone el *cromosoma* del mismo. Los dígitos que forman el cromosoma son los *genes*. En resumen, una solución es una serie de dígitos, de longitud constante para cada problema.

El tamaño de los individuos, longitud de su cromosoma, está determinado por el número de variables del problema, la precisión de las mismas y el sistema de numeración o codificación empleado, siendo el binario el más frecuente. En general, si en un problema dado el tamaño de los individuos es s , y el sistema de numeración utiliza k caracteres, el máximo número de soluciones, individuos, diferentes que pueden considerarse es k^s . En cuanto a la precisión o incremento de los valores de las variables, una variable cualquiera x , que tenga n genes representativos y esté acotada entre x_{max} y x_{min} tendrá, para una codificación en binario, la precisión p , siguiente:

$$p = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^n - 1} \quad (5.49)$$

La descripción del algoritmo genético que se aplica en este trabajo se va a basar en el problema concreto a resolver: la optimización de la programación de una campaña de riego, por surcos, de maíz en el valle del Guadalquivir. El ciclo del maíz dura aproximadamente

150 días por lo que la campaña se ha dividido en 21 semanas. Se consideran tres variables: la lámina, H , el caudal, q , y otra variable booleana, R , para decidir si se riega o no. Estas variables se repetirán durante el número de semanas que dure el ciclo del cultivo. El cromosoma que identifica cada solución esta formado por una cadena de genes que representan 63 variables, 3×21 .

En el caso de la programación óptima de riegos, la subcadena de dígitos correspondiente a una semana aislada se ha definido con una longitud de ocho genes que se distribuyen del modo siguiente:

- El primer dígito o gen (1 ó 0) corresponde a la variable R , regar o no regar.
- Los cuatro siguientes corresponden a la lámina de riego, cuyos valores estarán comprendidos entre la lámina mínima, H_{min} , y $H_{min} + 105$, en mm. Por tanto, H puede tomar 2^4 valores, con un incremento de 7 mm entre ellos. H_{min} depende principalmente del tipo de suelo y de la disponibilidad de agua, en este trabajo se toma $H_{min} = 10$.
- Los tres últimos corresponden al caudal, que tomará unos valores comprendidos entre el caudal mínimo, q_{min} , y $q_{min} + 2,1$, en l/s. Por tanto, q puede tomar 2^3 valores, con una precisión de 0,3 l/s. La elección de q_{min} depende principalmente del límite erosivo. Se ha tomado $q_{min} = 0,5$.

El hecho de haber tomado 105 y 2,1 como amplitud del intervalo de lámina y de caudal respectivamente, responde a la necesidad de que dichas variables tomen unos valores lógicos en la práctica habitual del riego por superficie y se esté dentro de los límites aconsejables para la parcela de referencia en cuanto al caudal máximo no erosivo propuestos en el apartado V.1.4.2. En cuanto a la precisión de las mismas, se considera suficiente para los propósitos de este trabajo.

El cromosoma de un individuo será similar al del gráfico siguiente, compuesto por una cadena de 168 genes (8×21).

Gráfico 4
Esquema del cromosoma

Semana 1	Semana 2			Semana 21
0 0101 110	1 1100 010			0 1001 011
R_1 H_1 q_1	R_2 H_2 q_2			R_3 H_{21} q_{21}

La ecuación general para decodificar el código binario se puede expresar como:

$$D = \sum_{i=1}^{nc} B \cdot 2^{i-1} \quad (5.50)$$

donde D es un entero decimal que indica el número de veces que hay que sumar el incremento al valor mínimo de la variable, nc es el número de caracteres de la cadena binaria, i indica la posición en la cadena y B es el carácter binario, 0 ó 1, de la posición correspondiente.

Centrándonos en una subcadena que corresponda a una semana cualquiera: 10000101

La interpretación de los valores que toman las variables es como sigue:

$R = 1$ equivale a que esa semana se riegue

$H = 0000 \Rightarrow H = 0$, por lo que se regará con el primer valor del intervalo, es decir, $H_{min} + 0 \cdot 7 = H_{min}$.

$q = 101 \equiv 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 5$ por lo que al primer valor del intervalo, q_{min} hay que sumarle 5 veces la precisión de esta variable, 0,3. Por tanto, se aplicará un caudal igual a $q_{min} + 5 \cdot 0,3$

V.2.3. Población inicial y número de generaciones

Un algoritmo genético es un proceso iterativo. Para iniciar el algoritmo es necesario fijar el tamaño de las sucesivas poblaciones. Se denomina *tamaño de la población*, N , de cada *generación* al número de soluciones, individuos, que se evalúa en cada iteración. En general, el tamaño de la población se mantiene constante en todas las generaciones. La *población inicial* se genera por un procedimiento de azar, formando un cromosoma para cada individuo mediante una sucesión aleatoria de dígitos, genes, del sistema numérico elegido.

El tamaño de la población se fija de forma arbitraria pero está directamente relacionado con el tamaño de los individuos, o lo que es lo mismo, con el número total de posibles soluciones del problema. Puede oscilar entre 20 para problemas muy pequeños y 1.000 individuos para problemas grandes (García-Guzmán, 1997).

Mediante la actuación de los operadores genéticos se consiguen individuos mejor adaptados, si se trata de un proceso natural, generación tras generación. En el caso de un problema matemático esto significa una aproximación a la solución óptima. Con el empleo de un algoritmo genético, las primeras generaciones mejoran muy rápidamente la solución, pero a medida que avanzan las iteraciones, la población se hace más homogénea y la aproximación al óptimo es más lenta.

En principio, la finalización del algoritmo puede realizarse de varias formas. Por ejemplo, cuantificar el grado de homogeneidad de los valores de mérito de la población, según parámetros como la media y la varianza, finalizando el algoritmo cuando se alcance o

supere un límite determinado. Otro criterio, empleado en este trabajo, es fijar a priori el número de generaciones que se van a analizar.

V.2.4. Evaluación de la función objetivo. Restricciones

Para establecer la sucesión de generaciones en un algoritmo genético es necesario hacer una evaluación de los individuos obtenidos en cada generación. La calificación o *valor de mérito* de los individuos se calcula mediante una *función de mérito*, Z , o función objetivo a maximizar o minimizar. La única condición que debe cumplir es ser creciente con los valores crecientes de la función a maximizar o con los valores decrecientes de la misma, si el problema es de minimización. Si se trata de un problema de máximo, el valor de mérito de cada individuo i es $Z_i = f(X_i)$; en un problema de mínimo, en cambio, $Z_i = 1/f(X_i)$.

Los algoritmos genéticos son algoritmos ideados para resolver problemas sin restricciones, pero éstas se pueden considerar mediante funciones de penalización combinadas con la función objetivo (Goldberg, 1989). En general, un problema de maximización con restricciones consiste en:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar } g(x) \\ &\text{sujeto a } h_i(x) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

donde x representa una serie de variables

Se transforma en un problema sin restricciones:

$$\text{maximizar } g(x) + c \cdot \sum_{i=1}^n \Phi[h_i(x)]$$

donde Φ es la función de penalización y c es el coeficiente de penalización.

En este trabajo, aunque se tiene en cuenta la penalización o coste de la escorrentía y de la percolación, se ha considerado como única restricción a la maximización de la ecuación 5.39 el estado de humedad del suelo al final de la campaña. La razón es evitar que el suelo esté encharcado en el momento de la recolección. La cuantificación de la humedad del suelo se realiza mediante el déficit de la misma, tomando como referencia la humedad a capacidad de campo. Para ello, se ha de definir o fijar el déficit de humedad requerido al final de la campaña, SMD_r , en mm, y la penalización, K , en ptas/mm, a *aplicar solamente cuando el déficit final, SMD_f sea menor que el deseado*, ya que esto implicaría que la cantidad de agua en el suelo sería mayor a la deseada.

$$\text{Penalización} = K \cdot (SMD_r - SMD_f) \quad (5.51)$$

La función objetivo penalizada resulta de sustraer esta penalización a la ecuación (5.39).

Por otra parte, se podría pensar en la posibilidad de ocurrencia de un déficit negativo cuando la lámina aplicada supere a la suma del déficit del día anterior y la evapotranspiración, por ejemplo, cuando se den dos riegos poco espaciados en el tiempo y con una lámina considerable. En este caso, conforme a la ecuación de balance de humedad (5.1), el déficit de humedad será igual a cero y la penalización de esta práctica inadecuada está recogida en la función de costes mediante el precio del agua de escorrentía y percolación.

Como el problema a resolver es la maximización del beneficio, los valores de mérito tenderán todos a ser positivos. Sin embargo, en las primeras generaciones puede ocurrir que algún individuo tuviese valor de mérito negativo, en este caso, se sumaría a la función de mérito una cantidad constante de forma que se eliminasen los valores de mérito negativos y la comparación se realizara sólo entre valores positivos, es decir:

$$-c_0 = \min(f(X_1), \dots, f(X_N)), \quad c_0 > 0 \quad (5.52)$$

y la nueva función de mérito sería

$$Z_i = f(X_i) + c_1, \quad i = 1, \dots, N \quad (c_1 \geq c_0) \quad (5.53)$$

V.2.5. Operadores Genéticos

Los operadores genéticos, selección, cruce y mutación, son una serie de operaciones que imitan al proceso de selección natural. Su función es definir, a partir de la generación actual, la generación siguiente de modo que los individuos sean cada vez mejores.

V.2.5.1. Selección

Consiste en elegir, según un criterio determinado, los individuos que van a formar parte de la siguiente generación.

Una vez calculado el mérito de todos los individuos, la selección de parejas con un algoritmo genético simple se realiza mediante un proceso de azar, asignando a cada individuo una probabilidad de ser seleccionado, p_{si} , proporcional a su valor de mérito (Goldberg, 1989):

$$p_{si} = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^N Z_i} = \frac{Z_i}{N \cdot \bar{Z}} \quad (5.54)$$

donde:

$\bar{Z} \equiv$ valor de mérito medio

$Z_i \equiv$ valor de mérito del individuo i

La selección mediante p_{si} presenta un pequeño inconveniente. El número esperado de hijos en la siguiente generación es $N \cdot p_{si}$, por tanto, conviene recordar que si p_{si} está próxima a 1, el individuo i será progenitor de casi todos los individuos de la generación y el resultado será una población demasiado homogénea. Una forma de suavizar las diferencias entre calificaciones es realizar un *ajuste lineal*, calculando unos nuevos valores, Z'_i .

$$Z'_i = a + b \cdot Z_i$$

Para determinar las constantes a y b se adopta el siguiente criterio (Guzmán, 1997):

- que el individuo medio mantenga la misma valoración y, por tanto, la probabilidad de selección.

$$\bar{Z} = \bar{Z}'$$

- que el mejor de los individuos mantenga el número esperado de hijos por debajo de una constante:

$$N \cdot p'_{smax} = N \cdot Z'_{max} / (N \cdot Z) = Z'_{max} / Z \leq n_o$$

n_o será un parámetro a definir por el usuario del algoritmo genético. En poblaciones pequeñas (N comprendido entre 50 y 100) se suele tomar n_o entre 1,5 y 2,5 lo que supondría que el número esperado de hijos del mejor individuo llega a representar entre el 1,5 por ciento ($N=100$ y $n_o=1,5$) y el por ciento ($N=50$ y $n_o=2,5$) de la población siguiente. En la aplicación informática que se ha desarrollado, n_o se expresa directamente en porcentaje.

De las relaciones anteriores se obtienen, con $Z'_{max} = n_o \cdot Z$, dos ecuaciones que permiten calcular a y b :

$$\bar{Z}' = a + b \cdot \bar{Z} \qquad n_o \cdot Z = a + b \cdot Z_{max} \qquad (5.55 \text{ a, b})$$

Con este procedimiento pueden volver a aparecer valores Z' negativos para los peores individuos, y sería necesario recalculer los valores Z' añadiendo una constante positiva, tal como se ha comentado en el apartado anterior.

Como se ha puesto de manifiesto, con el proceso de linealización de la función de mérito se pretende mantener un nivel apropiado de competitividad a lo largo de la simulación, evitando la dominancia de individuos muy buenos. Sin embargo, con el paso de las generaciones, el grado de convergencia u homogeneidad de la población va aumentando y la competencia entre los individuos es escasa. Entonces interesa acentuar las diferencias entre los miembros de la población de modo que los mejores se vean beneficiados (Goldberg, 1989). Uno de los métodos existentes consiste en aplicarle un exponente a la función de mérito (Dandy y col., 1996). En este trabajo el exponente se aplica a la función

linealizada, dicho exponente aumenta una unidad cada vez que transcurren quince generaciones, así por ejemplo, en la generación dieciséis el exponente será igual a dos.

Una vez que todos los individuos tienen asignada una probabilidad de selección, la selección de los mismos se realiza del modo siguiente:

Individuo	Probabilidad de selección	Probabilidad acumulada
l_1	p_{s1}	p_{s1}
.	.	.
l_i	p_{si}	$p_{s1} + p_{s2} + \dots + p_{si}$
.	.	.
l_n	p_{sn}	$p_{s1} + \dots + p_{sn} = 1$

Se generan m números aleatorios comprendidos entre 0 y 1:

$$r_n \equiv n^{\circ} \text{ aleatorio ; } r_n \sim U(0,1)$$

Si $r_n \leq p_{s1}$ elegir l_1

Si $p_{s1} + p_{s2} + \dots + p_{si-1} < r_n \leq p_{s1} + p_{s2} + \dots + p_{si}$ elegir l_i

Otra posible alternativa de selección es la propuesta por Montesinos y col. (1997), basada en criterios deterministas. Consiste en la ordenación de los individuos en función de su valor de mérito y la sustitución de los peores por los mejores. Este proceso se detalla a continuación:

- En primer lugar, se ordenan los individuos en sentido creciente de modo que el menos apto tendrá un número de orden 1 y el mejor será el N. (gráfico 5 a).
- En segundo lugar, se asigna un índice de selección, is_i , a los individuos extremos:

$$is_1 = \frac{2-c}{N} \quad ; \quad is_N = \frac{c}{N} \quad c \in (1.5, 2] \quad (5.56 \text{ a, b})$$

El índice de selección de los individuos intermedios se obtiene por interpolación entre los extremos, en función de su número de orden i :

$$is_i = is_1 + \frac{is_N - is_1}{N-1} (i-1) \quad (5.57)$$

El valor del parámetro c permite controlar el porcentaje de individuos que se duplican y eliminan en cada generación. Como máximo, se duplicará un 25 por ciento cuando $c = 2$. En este trabajo se adopta $c = 1,8$ por los buenos resultados obtenidos en trabajos anteriores, e implica duplicar el 18,8 por ciento de los individuos (Montesinos, 1995).

- En tercer lugar, se calcula para cada individuo el producto $N \cdot i_s$ y se redondea al entero más próximo, siendo 0, 1 y 2 los únicos resultados posibles. Los individuos a los que haya correspondido un 0 se eliminarán, a los que les haya correspondido un 1 se mantendrán y a los que les haya correspondido un 2 se duplicarán. El número de individuos duplicados y eliminados es idéntico, ya que las amplitudes de los intervalos de individuos con índices de selección 2 y 0 son idénticos, así para $i_s = 2$, la amplitud es $c - 1,5$, y para $i_s = 0$ es $0,5 - (2 - c)$. Los peores individuos son sustituidos por el duplicado de los mejores, de modo que el peor es sustituido por el mejor y así sucesivamente (gráfico 5 b).

Este trabajo permite la utilización de las dos alternativas de selección descritas anteriormente. Para distinguirlas, la descrita en primer lugar basada en la asignación de probabilidades de selección será referida como método de probabilidades de selección, y la basada en la ordenación y sustitución de los individuos será referida como método de ordenación. A su vez, el método de probabilidades de selección emplea una función de mérito linealizada y exponencial.

V.2.5.2. Cruzamiento

Una vez seleccionados los individuos que van a ser progenitores en la siguiente generación, es necesario definir el modo de emparejamiento o manera según la cual se van a reproducir.

Según el método de las probabilidades de selección, las parejas se forman automáticamente cada vez que se seleccionan dos individuos sucesivos. De este modo, podría ocurrir que una pareja estuviese formada por el mismo individuo repetido y, por tanto, el cruce no tendría ningún efecto. Esto se puede aceptar, o bien no considerar formada la pareja hasta obtener un individuo distinto al primero, siendo ésta la opción adoptada en este trabajo.

Por otra parte, el hecho de que una pareja formada se cruce puede controlarse mediante una probabilidad de cruce, p_c , que suele tomar valores entre 0,6 y 1 (Goldberg, 1989 y Ritzel y col., 1994).

En el caso del método de selección por ordenación y sustitución, las parejas se forman por proximidad, es decir, el primer individuo se cruza con el segundo, el tercero con el cuarto y así sucesivamente. De este modo estamos cruzando individuos de méritos similares (gráfico 5 c).

Una vez determinados las parejas que se van a cruzar, el cruzamiento se puede realizar a partir de uno o varios puntos de la cadena (Goldberg, 1989 y Wang, 1991). En este trabajo, se considera para cada pareja de individuos una *posición de cruzamiento* al azar, a partir de la cual se intercambian los genes de sus cromosomas a partir de esa posición, obteniendo dos nuevos cromosomas pertenecientes a los hijos recién generados (gráfico 5c). La posición de cruzamiento puede variar entre 1 y $r-1$, siendo r el tamaño de los individuos, ya que, si la posición escogida fuese r los individuos serían iguales que los padres.

En la nueva generación, los padres desaparecen pero sus genes se mantienen en los hijos. Si se quiere que permanezcan los p mejores padres de una generación en la siguiente, el proceso de selección y cruce se realiza para $N-p$ individuos, y a la nueva generación se añaden, sin cambios, los p mejores individuos de la anterior. En el gráfico 5 c se expone un ejemplo de cruzamiento con $p=2$, es decir, los dos mejores individuos no se cruzan.

V.2.5.3. Mutación

El último paso de las operaciones de transformación lo constituye el proceso de mutación que consiste en elegir aleatoriamente un número α del intervalo $(1, N \cdot r)$, y si a la posición α del cromosoma le corresponde un 1 se coloca un 0 y viceversa. Esto sería en el caso de emplear el código binario. En general, si el sistema de representación elegido tiene k símbolos, es necesario seleccionar al azar un símbolo entre un total de $k-1$ símbolos de modo que, al gen que muta, se le asigna un valor diferente al actual.

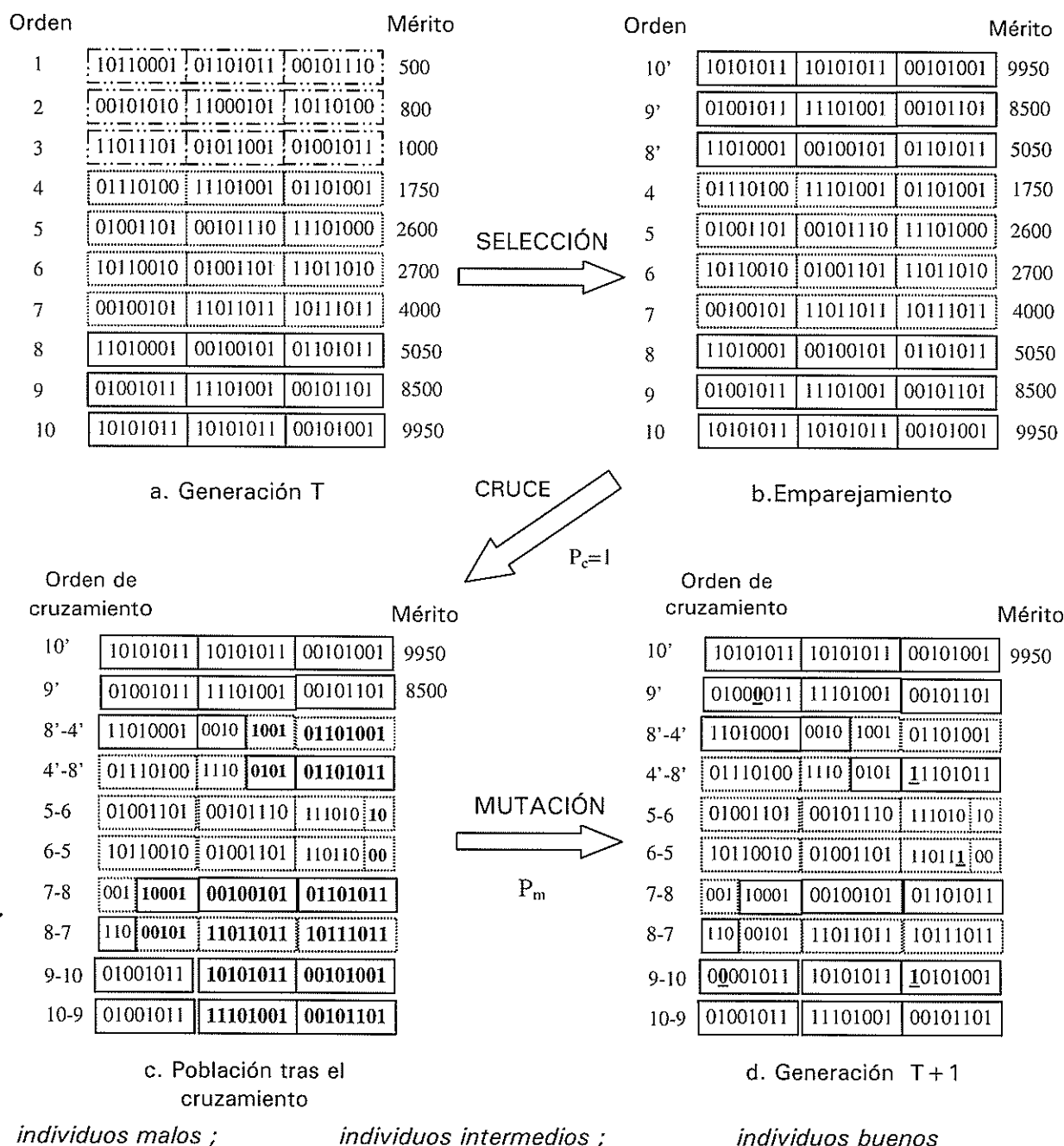
La mutación aumenta la posibilidad de escrutar zonas del espacio de búsqueda que, de otra manera, quedarían ocultas. Si por azar, en la primera generación todos los individuos tienen el mismo gen en la misma posición, es obvio que, por cruzamiento, todos los hijos mantendrán ese gen igual. Por tanto, sería imposible acceder a la solución o soluciones, dependiendo del sistema de numeración empleado, que se derivarían de la variación de ese gen.

Por otra parte, el proceso de selección y cruce de los mejores, origina que cada generación vaya siendo mejor que la anterior, pero también más homogénea. Se corre el riesgo de estancarse en una población de individuos iguales, en la que no se ha alcanzado el óptimo, y que por selección y cruce sólo generará una copia de sí misma. Después de los cruzamientos y antes de evaluar la nueva generación, se seleccionan al azar los genes a mutar. La *tasa o probabilidad de mutación*, p_m , debe ser razonablemente pequeña para no destruir una parte significativa de un material bien adaptado y perder una información valiosa que ha requerido varias generaciones de cálculos. Por esta razón, p_m generalmente toma valores pequeños, entre 0,001 y 0,01 (Goldberg, 1989; Wang, 1991). (gráfico 5 d).

En la naturaleza, para una tasa p_m de mutación de los genes, el número medio de genes mutados en cada generación es $N \cdot r \cdot p_m$, con una varianza de $N \cdot r \cdot p_m \cdot (1 - p_m)$. Hay varios procedimientos de cálculo para seleccionar los genes que mutan de modo que se mantenga

el número medio de genes mutados aunque la varianza será distinta (García-Guzmán, 1997). En este trabajo, el proceso de mutación es común para los dos métodos de selección planteados. La determinación de los dígitos que mutan se realiza generando dos números aleatorios, uno en el intervalo $[2, N]$ para elegir al individuo, el mejor no se modifica, y otro en el intervalo $[1, r]$ para definir la posición en el cromosoma. De este modo, un mismo individuo puede sufrir varias mutaciones.

Gráfico 5 a, b, c, d
Evolución de una población mediante los operadores genéticos



V.3. Asignación de valores a los parámetros del algoritmo genético

El proceso de búsqueda del óptimo depende del método de selección de los individuos y parámetros como p_m , n_o , N y el número de generaciones, descritos en el apartado anterior. La búsqueda eficiente del máximo de un problema implica conseguir, en el menor tiempo posible, una solución lo más próxima al óptimo global. Con este objetivo se realizan un conjunto de pruebas para seleccionar los valores que tomarán los parámetros citados anteriormente. Algunos de ellos son necesarios en ambos métodos de selección y se estudiarán los siguientes valores:

$$p_m \equiv 0,001, 0,005 \text{ y } 0,007.$$

$$N \equiv 100, 200, 500 \text{ y } 1.000.$$

$$\text{Número de generaciones} \equiv 35, 70 \text{ y } 100.$$

$$\text{Coeficiente de penalización} \equiv 1.000, 50.000, 100.000 \text{ y } 200.000 \text{ ptas/mm}$$

No se ha considerado la influencia de p_c , pues siempre toma el valor unidad. En cuanto al método de probabilidades de selección, n_o toma los valores 2, 5 y 8, expresados en porcentaje según se indicó en V.2.5.1. El proceso de linealización, tendrá lugar únicamente en las dos primeras generaciones y el exponente de la función de mérito aumenta una unidad cada 15 generaciones. En lo referente al método de ordenación, el valor $c = 1,8$ se considera fijo.

Los gráficos 6 a 11 reflejan el resultado de las pruebas realizadas. En ellas se aprecia el proceso de maximización del beneficio frente al número de generaciones. Éste no presenta picos puesto que la mejor solución de cada generación pasa intacta a la siguiente. Todas se han realizado utilizando los datos de la parcela de referencia (apartado VI.2), en la que el coste del agua es de 0,756 ptas/m³, y considerando iguales el coste del agua de escorrentía y percolación, tomando el valor de 10 ptas/m³.

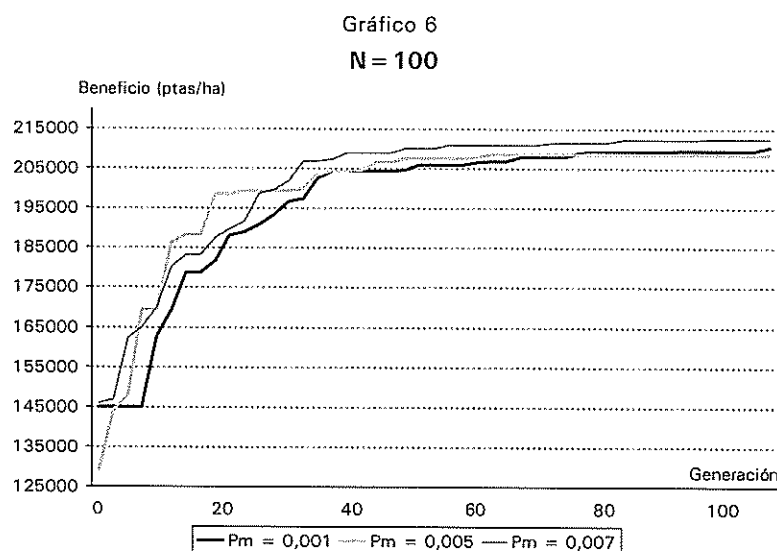
En primer lugar, los gráficos 6 - 9 muestran la influencia de la tasa de mutación para diferentes tamaños de población y número de generaciones. Estas pruebas se han realizado empleando el método de ordenación y sustitución de los individuos por haber dado resultados ligeramente mejores en varias simulaciones previas. Se ha tomado un coeficiente de penalización de 100.000 ptas/mm. Aunque los resultados son similares, se puede apreciar que la tasa de mutación más efectiva es 0,005, así como una población de 500 individuos a lo largo de 70 generaciones (gráfico 8). En cuanto a la maximización del beneficio, se aprecia un crecimiento muy rápido durante las 25 generaciones primeras, para estabilizarse en torno a la 50. Se puede apreciar que para todos los tamaños de población probados, exceptuando la prueba con menor número de iteraciones, los mejores resultados se han obtenido con una tasa de mutación de 0,005. En cualquier caso, las

diferencias no son demasiado grandes, así, entre el mayor beneficio obtenido (500 x 70 iteraciones) y el menor (100x100 iteraciones) hay un margen de unas 9.000 ptas/ha. Esto supone una variación de un 4 por ciento respecto al máximo (218.160 ptas/ha).

En segundo lugar, en el gráfico 10 se analiza la sensibilidad del coeficiente de penalización, manteniendo constantes la tasa de mutación, 0,005, y el tamaño de población, 500 individuos 70 generaciones. Puede observarse cierta tendencia a la obtención de óptimos menores al aumentar la penalización. El mejor resultado, tanto en valor del beneficio como en la rapidez de su obtención se logra para $K = 1.000$.

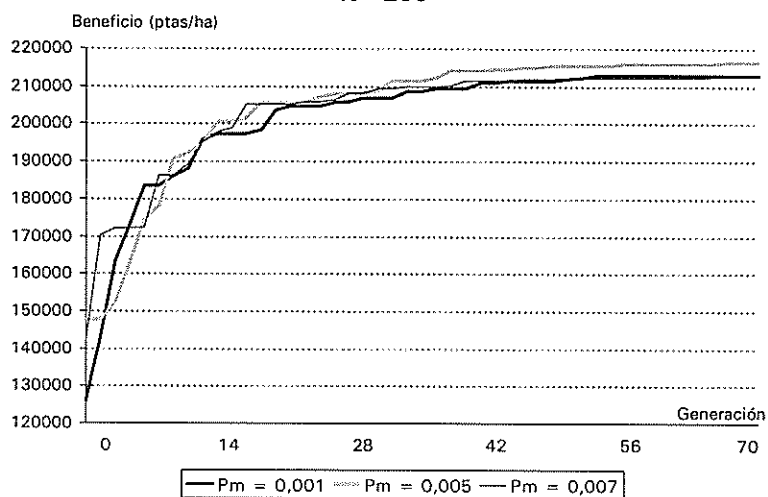
Por último, las pruebas del gráfico 11 se han realizado empleando el método de selección probabilístico, probando distintos valores del parámetro n_0 del proceso de linealización. Se ha mantenido constante el coeficiente de penalización, 1.000, y los mismos valores para los parámetros N , p_m y número de generaciones que en el gráfico 10. La mejor simulación se ha logrado con $n_0 = 5$. En cualquier caso, puede apreciarse que con este método el óptimo obtenido es sensiblemente menor y el proceso de optimización es algo más progresivo, mostrando una curva más suavizada. Los óptimos obtenidos presentan tan sólo una diferencia de unas 3.200 ptas/ha, correspondiendo el mejor a $n_0 = 5$.

En consecuencia, las pruebas que se realizan para analizar la sensibilidad del coste del agua y de sus penalizaciones por escorrentía y drenaje, tendrán lugar con los valores de los parámetros que mejor resultado han dado: $p_m = 0,005$ y $K = 1.000$. Se empleará el método de ordenación, tomando un tamaño de población de 500 individuos, considerando suficiente la prolongación del proceso durante 60 generaciones.



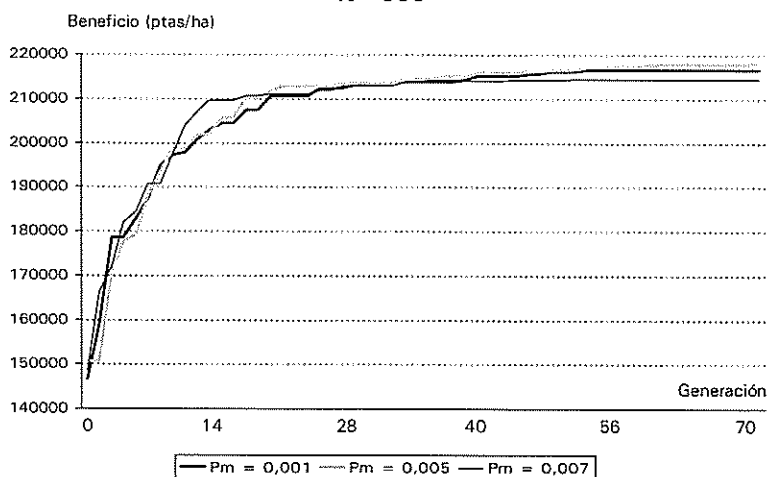
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7
N = 200



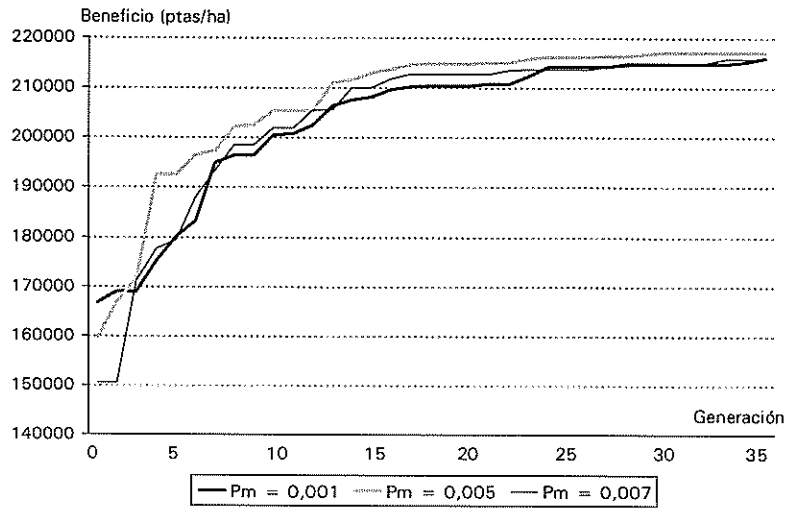
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8
N = 500



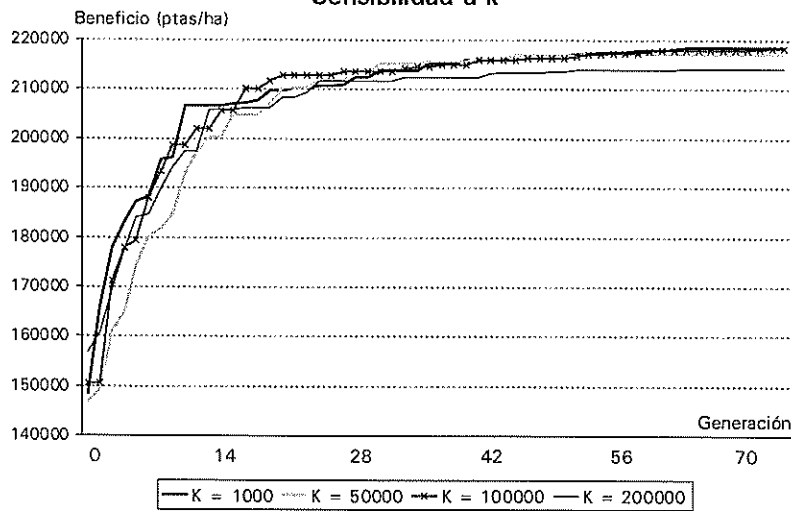
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9
N = 1000



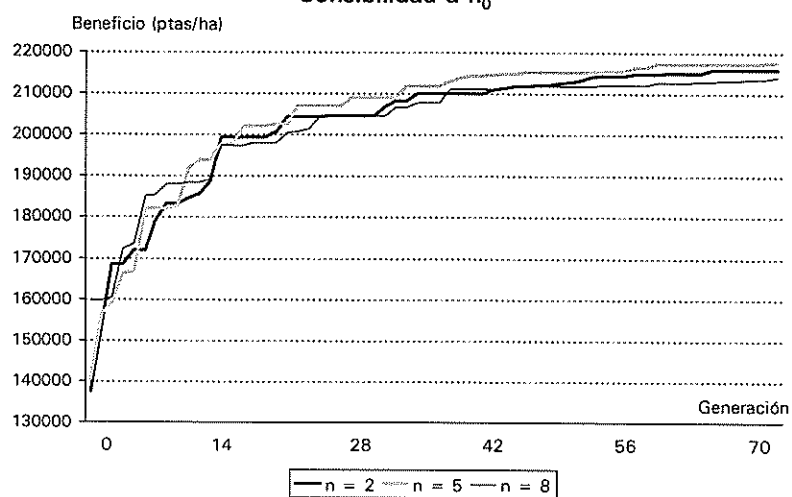
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
Sensibilidad a k



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11
Sensibilidad a n_0



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VI

PROGRAMA OPTIMEC

VI. PROGRAMA OPTIMEC

VI.1. Introducción

Este trabajo, que se ha venido explicando conceptualmente en los apartados anteriores, se concreta en un programa para ordenadores PCs y compatibles, llamado *OPTIMEC*, **OPTIM**ización **E**conómica del riego por surcos, y un fichero de base de datos denominado *RIEGOS*. Partiendo de unos datos climáticos, de campo y de cultivo, regado por surcos en pendiente y escurrentía libre, la utilidad principal del programa es determinar un calendario de riegos maximizando el beneficio económico. También permite simular un suceso de riego concreto o una campaña de riegos en base a uno de los criterios mencionados en el apartado V.1.1.5., estimando el beneficio que se obtendría. A lo largo de este apartado se irá describiendo el funcionamiento del programa, aunque siempre desde un punto de vista funcional y sin entrar en el detalle de la programación. Se remite al lector interesado en este aspecto a los manuales de Access y Visual Basic 5.0.

El programa se ha desarrollado haciendo uso de dos diferentes lenguajes de programación: Access, base de datos relacional y programable, y Visual Basic 5.0. En un principio, la aplicación se desarrolló exclusivamente en Access. Con vistas a obtener un fichero ejecutable y aumentar la velocidad de ejecución, se adaptó el código de Visual Access a Visual Basic 5.0, por ser muy similar. La mejora conseguida en cuanto a velocidad de ejecución supone un 40 por ciento aproximadamente.

Como es lógico, el tiempo de ejecución depende en gran medida del tipo de procesador del ordenador y, en menor grado, de su memoria RAM. Se han probado distintos equipos obteniendo, para una prueba con *OPTIMEC* de 1.000 iteraciones, los tiempos de ejecución que aparecen en el Cuadro 3.

Cuadro 3
Tiempos de ejecución en función de las
características del ordenador

Procesador	RAM (MB)	Tiempo (min)
P-150	32	63,7
P-166 MMX	32	48,5
P-200 MMX	32	41,3
P-266 MMX	64	35,2

Fuente: Elaboración propia.

Para ejecutar el programa es necesario instalar el archivo de base de datos *RIEGOS.mdb* en *C:\Surcos* y que las tablas de dicha base de datos estén cerradas. La ejecución convencional se realiza mediante el archivo *OPTIMEC.exe*, pero el usuario puede sacar, si cabe, mayor partido de los datos calculados si conoce el entorno de Access. Aunque este trabajo no pretende ser un manual del mismo, a continuación se describe brevemente la utilidad de dicho programa, así como los requisitos necesarios del ordenador para que funcione correctamente.

Access es un sistema interactivo de administración de bases de datos para Windows. Como base de datos, es decir, colección de datos sobre un tema, la información se almacena en las llamadas *tablas*, aunque la presentación sea de diversas formas según las necesidades: *formularios*, *consultas*, *informes*, etc. Access organiza y analiza los datos, pudiendo conseguir una base de datos relacional, es decir, que los datos se organicen en relación con temas que interesen. De este modo, se facilita la búsqueda, el análisis y el mantenimiento de los datos.

Para poder trabajar con Access se necesita, al menos:

- ☐ Un ordenador personal compatible con un procesador 80386 o superior.
- ☐ Un disco duro con 20 Mbytes de espacio libre como mínimo.
- ☐ Un ratón compatible con Microsoft.
- ☐ Monitor EGA, VGA o superior.
- ☐ Memoria RAM mínima de 8 Mbytes, aunque se recomiendan 16 o más.
- ☐ MS-DOS versión 3.1 o superior.
- ☐ El entorno operativo Microsoft Windows versión 3.1 o superior.

VI.1.1. Descripción y manejo del fichero base de datos RIEGOS

El fichero *RIEGOS* consta de una serie de tablas, consultas y formularios cuyo manejo y descripción se detalla a continuación.

VI.1.1.1. Tablas

En un Cuadro los campos o columnas pueden contener distintos tipos de datos, que se almacenan en una serie de registros o filas. La base de datos *RIEGOS* contiene siete tablas, de las cuales tres (*Cultivo*, *Suelo* y *Clima*) son de entrada de datos, y las cuatro restantes (*Kc_Cultivo*, *Balance_Humedad*, *Avance* y *Optimización*) se generan mediante el código cuando se ejecuta el programa *OPTIMEC.exe*.

Las dimensiones de las tablas generadas (cuadros 7, 8, 9 y 10) son excesivas como para ser recogidas en papel, principalmente *Avance* y *Balance_Humedad*, llegando a contener millones de registros en una prueba con un número de iteraciones medianamente grande. Por esta razón, y dado que las soluciones alcanzadas en las primeras generaciones no son

buenas, se ha optado por guardar solamente los datos correspondientes a la última generación. Aún así, estas tablas contendrán miles de registros. Por su parte, *Kc_Cultivo* contendrá tantos registros como días dure el ciclo del cultivo y *Optimización* tantos como generaciones tenga el proceso de optimización.

En general, los datos de las respectivas tablas guardan relación con el nombre de las mismas. En cualquier caso, seguidamente se presenta una muestra para conocer cada una de ellas, comenzando por las de introducción de datos. En cuanto a las generadas, aunque se muestran todos sus campos, se recoge tan solo una pequeña parte de los registros de las mismas. Es importante señalar que el usuario encontrará detalles relativos a cada campo (conceptos y unidades de las magnitudes principalmente) en la línea de comentarios que aparece en la parte inferior de la pantalla. Solamente es necesario situar el cursor sobre cualquier registro del campo deseado.

Comenzando por el Cuadro 4, *Cuadro Clima*, en el campo *Localidad* se indica el nombre de las estaciones o poblaciones donde se han tomado los datos climáticos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, en mm/día, campo *ETo*. Éste debe ser introducido por el usuario para cada registro del campo *Fecha*.

Cuadro 4 Cuadro Clima		
Localidad	Fecha	Eto
Córdoba	25/04/98	3,83
Córdoba	26/04/98	4,001
Córdoba	27/04/98	4,013
Córdoba	28/04/98	3,906
Córdoba	29/04/98	4,18

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 5 es el Cuadro *Suelo* y sirve para introducir los datos relativos a los límites de humedad del suelo en porcentaje volumétrico (campos *CC* y *PMP*), sus características de infiltración (campos *a* y *K*, en $\text{m}^3/\text{m}/\text{min}^a$), la geometría del surco (campos $P1 \equiv p_1$ y $P2 \equiv p_2$), su longitud en metros (campo *L*) y su pendiente media en tanto por uno (campo *lo*). En casi todos los casos el nombre de los campos coincide con el que se ha venido empleando para definir la variable o dato que contienen. La excepción son los parámetros empíricos del surco ya que el lenguaje de programación no cuenta con los caracteres necesarios.

El último Cuadro de entrada de datos es el Cuadro 6, que contiene los relativos a los cultivos: su fecha de siembra (campo *Fecha*), profundidad radicular mínima y máxima (campos *RDmin* y *Rdmax*, en mm), tiempo hasta alcanzar ésta (campos *NDef*), duración de las fases de desarrollo (campos *Di*), coeficientes de cultivo (campos *Kci*) y de respuesta en el rendimiento de dichas fases (campos *Kyi*). El campo *Ymax* contiene el rendimiento potencial, en kg/ha, y el campo *Pc* el precio esperado de cosecha, en pesetas.

En cuanto a las tablas generadas o de salida, el Cuadro 7 contiene los datos relativos a las curvas de avance y receso (campos *Ta*, y *T* en min, y *x* en m) e infiltración (campo *Z*, en mm) de cada riego realizado. El campo *Prueba* representa el número de individuo dentro de una misma *Generación*, siendo cada individuo una simulación de una campaña de riegos. También se almacena el número de cada riego a lo largo de la campaña (campo *Riego*), su fecha (campo *Fecha*), déficit de humedad del día anterior (campo *SMDa*, en mm), parámetros de calidad (campos *Ra*, *Ce*, *Cp* y *UD*) y volúmenes de escorrentía y percolación (campos *Vesc* y *Vp*, en m³/ha). Éste último se va acumulando para cada valor de distancia a lo largo del surco, *x*, siendo igual a cero a partir de la distancia en la que deja de haber percolación.

El Cuadro 8 contiene los datos del balance de humedad del suelo, ecuación 5.1, para cada día de la campaña. El campo *Ks* contiene el valor del coeficiente de estrés en función del déficit de humedad del día anterior. *ETmax* es la *ET*, en mm, que habría en ausencia de estrés ($Ks = 1$). También recoge el número de riego (campo *Regado*) y la lámina y el caudal que se aplica en cada uno (campos *Hr*, en mm, y *q*, en l/s). Por último, el campo *Lluvia* representa la precipitación efectiva.

El Cuadro 9 contiene, para cada día del ciclo, el valor correspondiente del coeficiente de cultivo (campo *Kc*), profundidad radicular (campo *RD*, en mm) y capacidad de almacenamiento de humedad en la zona radicular (campo *AWC*, en mm).

Por último, el Cuadro 10 es un reflejo del proceso de optimización. Muestra los datos de rendimiento estimado de cultivo (campo *Y*, en kg/ha), coste de la campaña (campo *Coste*, en ptas/ha) y beneficio neto de la misma (campo *Beneficio*, en ptas/ha) para la mejor prueba o simulación de cada generación. También recoge la media del beneficio obtenido en todas las pruebas de cada generación (campo *Media*). En las primeras generaciones es normal que este campo tome valores negativos debido a las penalizaciones aplicadas.

Cuadro 5
Suelo

CC	PMP	SMDi	SMDf	K	A	m	lo	L	S	P1	P2
38	20	0	90	0.0081	0.49	0.04	0.0025	180	0.75	0.381	2.777

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6
Cultivo

Cultivo	Fecha	RDmin	RDmax	NDef	D1	D2	D3	D4	Kc1	Kc3	Kc4	Ky1	Ky2	Ky3	Ky4	Ymax	PC	A	B
Maíz	16/04/98	100	1.000	60	30	30	60	30	0.2	1.18	0.45	0.4	0.4	1.3	0.5	13.000	25	5,66	4,28
Remolacha	10/01/98	100	1.000	10	30	30	60	30	0.2	1	0.5	0.4	0.4	0.8	0.5	3.000	30	5,66	4,28
Tabaco	1/05/98	100	1.000	60	20	30	30	30	0.5	1.2	0.8	0.4	1	1	0.5	2.150	38	5,66	4,28
Melón	15/03/98	100	900	60	30	30	45	30	0.18	1.1	0.1	0.5	0.6	1.1	0.8	50.000	8	4,03	2,84

Fuente: CIFA de Córdoba y Elaboración propia.

Cuadro 7
Avance

Gener.	Prueba	Culrico	Riego	Fecha	Ta	Tr	X	Z	SMDa	Vp	Vesc	Ra	Ce	Cp	UD
1	1	Maiz	1	13/06/98	0	166,99	0,00	132,6	108	0	0	0,00	0	0	0
1	1	Maiz	1	13/06/98	30	173,99	85,25	123,31	108	94,61	0	0,00	0	0	0
1	1	Maiz	1	13/06/98	60	177,61	129,3	111,67	108	117,9	0	0,00	0	0	0
1	1	Maiz	1	13/06/98	90	180,42	163,56	98,18	108	0	0	0,00	0	0	0
1	1	Maiz	1	13/06/98	112,13	181,77	180	86,38	108	0	306,86	0,71	0,21	0,08	0,73

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8
Balance Humedad

Generación	Prueba	Cultivo	Fecha	SMD	Ks	ET	ETmax	DP	Hr	q	Lluvia	Regado
1	1	Maiz	17/04/98	0,75	1,000	0,75	0,75	0	0,000	0	0	0
1	1	Maiz	18/04/98	1,51	0,993	0,76	0,76	0	0,000	0	0	0
1	1	Maiz	19/04/98	2,27	0,987	0,76	0,77	0	0,000	0	0	0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1	Maiz	13/06/98	26,51	0,795	6,18	6,18	0	86,384	2	0	1

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9
Cuadro Kc_Cultivo

Cultivo	Fecha	Kc	RD	AWC
Maíz	14/05/98	0,2	520	93,6
Maíz	15/05/98	0,2	535	96,3
Maíz	16/05/98	0,2	550	99
Maíz	17/05/98	0,233	565	101,7
Maíz	18/05/98	0,265	580	104,4
Maíz	19/05/98	0,298	595	107,1

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 10
Cuadro Optimización

Generación	Prueba	Y	Coste	Beneficio	Media
1	317	10.722,86	117.546,5	150.525,1	-2.854.962
2	1	10.722,86	117.546,5	150.525,1	-115.026
3	497	9.790,077	73.665,36	171.086,6	19.734,03
4	399	10.585,130	86.952,02	177.676,3	16.934,03
5	490	9.966,374	69.863,91	179.295,4	10.708,57
6	499	9.689,506	54.260,68	187.977	53.953,64

Fuente: Elaboración propia.

VI.1.1.2. Consultas

Una consulta permite ver una serie de datos seleccionados de una o varias tablas en base a unos criterios definidos por el usuario. Como se ha comentado en el apartado anterior, las tablas *Balance Humedad* y *Avance* pueden contener millones de registros, pero a la hora de consultar datos, la mayoría de las veces sólo se necesitan algunos de éstos, o bien interesa conocer menos campos de los que hay en total.

RIEGOS contiene tres consultas (*Consulta Programación*, *Consulta Avance* y *Consulta ET*) que se consideran interesantes para el usuario y se describen a continuación. Conviene aclarar que los datos que muestran estas consultas pueden ser visualizados con mayor comodidad abriendo los formularios que se explican en el punto siguiente. Por tanto, el usuario no tiene necesidad de abrir las consultas existentes. En cualquier caso, éste podrá crear las suyas propias.

- La *Consulta Programación* tiene como objeto presentar la información más relevante en cuanto a la programación de los riegos. Para ello, toma los datos de campos

pertenecientes a las tablas *Avance*, *Balance Humedad* y *Optimización*. Es la fuente del formulario *Programación*.

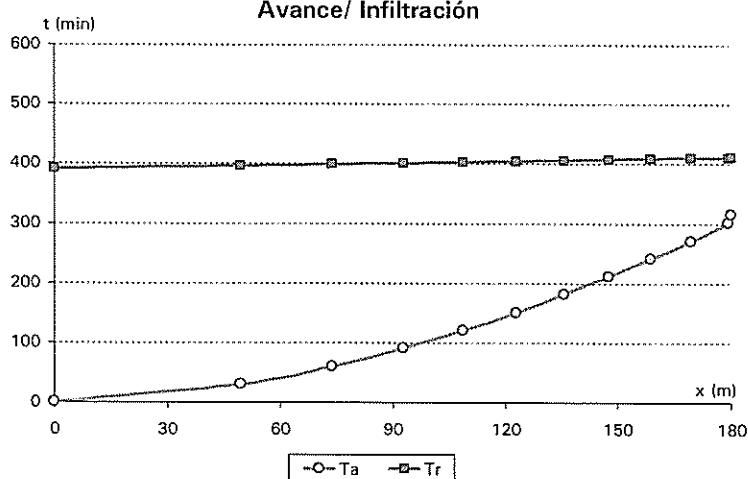
- *Consulta Avance* toma como referencia el Cuadro del mismo nombre y se ha realizado como base para el desarrollo del formulario *AVANCE/INFILTRACIÓN*, descrito en el apartado siguiente.
- *Consulta ET* es similar a la anterior en cuanto es la base del formulario *Gráfica ET/Etmax*, que se describe a continuación.

VI.1.1.3. Formularios

La utilización de formularios permite obtener una visión rápida de los datos de uno o varios registros, aparte de ser una manera más cómoda de introducir y modificar los valores. En RIEGOS se han definido cuatro formularios: *AVANCE/INFILTRACIÓN*, *Gráfica ET/Etmax*, *Gráfico Kc* y *Programación*.

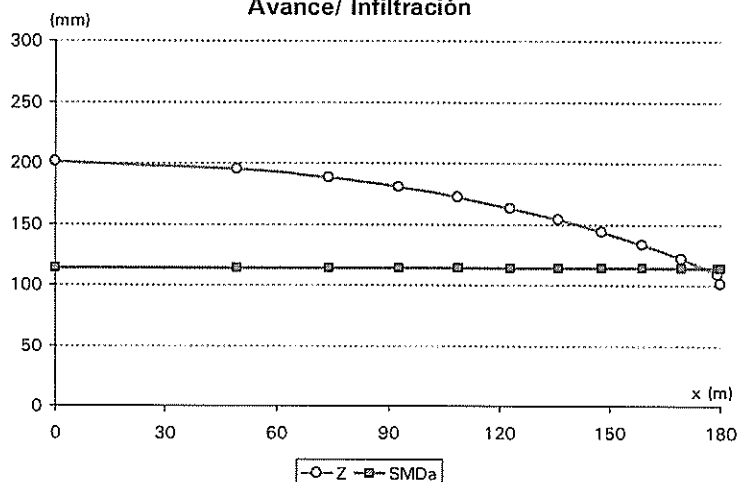
AVANCE/INFILTRACIÓN requiere la entrada de los datos que permitan localizar en el Cuadro *Avance* la información correspondiente al riego que se quiera visualizar, es decir, el número de *generación*, *prueba* y *riego*. Una vez introducidos por el usuario, el formulario presentará las gráficas *AVANCE/RECESO* e *INFILTRACIÓN*, similares a las de los gráficos 12 y 13 *AVANCE/RECESO* ya se ha comentado en el apartado V.1.2.3., por su parte, la gráfica *INFILTRACIÓN* presenta la lámina infiltrada a lo largo del surco y el déficit de humedad del suelo el día anterior al riego, *SMDa*. La lámina infiltrada en el extremo final del surco corresponde a la lámina de riego, *Hr*.

Gráfico 12
Gráfica Avance/ Receso del formulario
Avance/ Infiltración



Fuente: Elaboración propia.

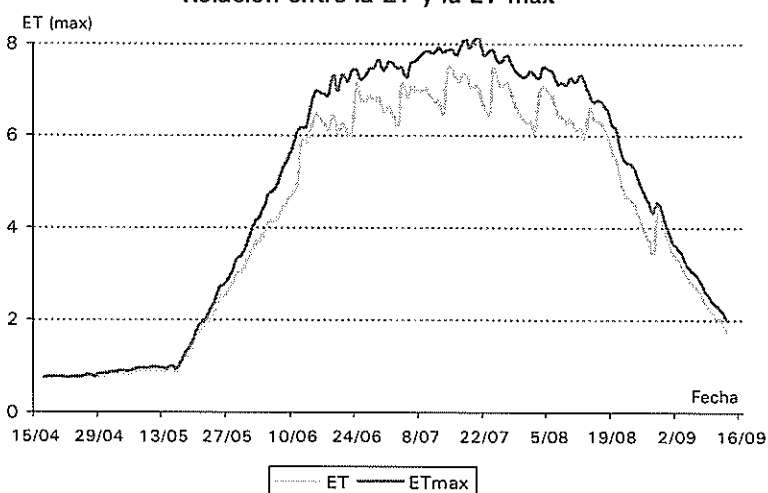
Gráfico 13
Gráfica Infiltración del formulario
Avance/ Infiltración



Fuente: Elaboración propia.

- En *Gráfica ET/ETmax* el usuario puede ver la relación existente entre la *ET* que hay a lo largo de la campaña, en función de los riegos que se apliquen, y la que habría si en ningún momento hubiese estrés hídrico, *ETmax*. El gráfico siguiente es un ejemplo de lo que ocurriría si regásemos cuando $SMD \geq AU$, con $q = 1,7$ (l/s) y $H_r = 0,7 \cdot SMD$ (mm). Los picos que se aprecian en la línea de *ET* corresponderían a las fechas de los riegos, siendo el primero el 11/6 y el último el 28/8.

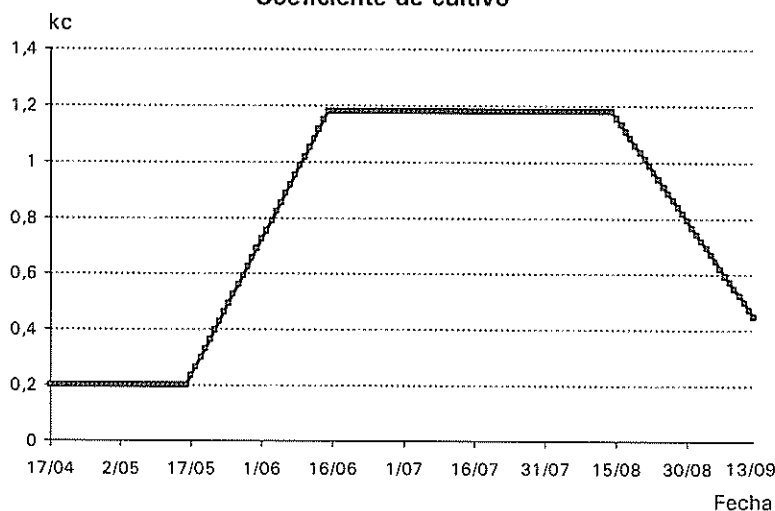
Gráfico 14
Relación entre la ET y la ET max



Fuente: Elaboración propia.

- El formulario *Gráfico Kc* es simplemente para representar gráficamente los valores del coeficiente de cultivo. El gráfico siguiente corresponde al coeficiente de cultivo del maíz sembrado el 16 de abril (Cuadro 6).

Gráfico 15
Coeficiente de cultivo



Fuente: Elaboración propia, 1998.

- El formulario *Programación* es probablemente el de mayor interés para el usuario, pues permite visualizar en una tabla toda la información relativa al calendario de riegos, la calidad de los mismos y el resultado económico de la campaña o prueba que se desee. Este formulario puede verse en el ejemplo de aplicación descrito en el apartado VI.2. El campo *Beneficio* muestra el beneficio neto estimado según la ecuación 5.39, Y es el rendimiento de cosecha esperado según 5.38 y *Coste* es el resultado de la función de costes 5.40.

Por último, conviene aclarar que, si bien la entrada de datos puede hacerse tanto desde *RIEGOS* como desde *OPTIMEC*, la visualización de los gráficos y de las tablas generadas solamente es posible desde *RIEGOS* mediante Access. En cuanto al manejo de *OPTIMEC*, el lector encontrará una breve descripción del mismo en el anexo III.

VI.2. Ejemplo de aplicación del programa OPTIMEC

Como ejemplo de uso del módulo de optimización se utiliza el programa con los datos reales de una parcela situada en el término municipal de Alcolea, en la vega del Guadalquivir. El resultado obtenido se comparará con los que se lograrían empleando los criterios de riego convencionales. Se ha supuesto que tras el invierno, el déficit en la fecha de siembra es cero, y el deseado al final de la campaña es igual o superior a la mitad de la humedad a capacidad de campo, es decir, 90 mm. Asimismo, es necesario recordar las simplificaciones adoptadas en este trabajo:

- ☐ Infiltración constante en el espacio y en el tiempo.
- ☐ Sección del surco constante en el espacio y en el tiempo.
- ☐ Ausencia de precipitación.
- ☐ Surcos con pendiente constante.
- ☐ No recorte de caudal.

Todas las pruebas realizadas en este trabajo se aplican al maíz. Los datos necesarios del cultivo se han tomado del C.I.F.A. de Córdoba y de la C.H.G.(Cuadro 6). La finca cuenta con un pozo que proporciona el agua de riego, cuyo coste se estima en 0,756 ptas/m³ para un nivel del pozo de 15 m de profundidad, 12 ptas/kWh y un rendimiento de la bomba del 65 por ciento. Se ha estimado un coste de mano de obra de 900 ptas/ha/riego, según datos suministrados por el propietario. No se han considerado en este caso costes de escorrentía y percolación profunda. El suelo de la parcela es de textura arcillo-limosa, lo que justifica los valores adoptados para los límites de humedad (Cuenca, 1989). Éstos y el resto de datos relativos al suelo, surcos y clima están recogidos en los cuadros 4 y 5 y para mayor detalle el lector puede acudir a los anexos 1 y 2. El Cuadro 11 recoge la programación resultante tras un proceso de optimización de 30.000 iteraciones (500 individuos x 60 generaciones), mientras que la programación del Cuadro 12 corresponde al mejor resultado obtenido tras realizar simulaciones con el resto de criterios de riego. Entre éstos, la opción que permite obtener mayores beneficios es regar cuando el déficit supera el agua útil, siendo las variables de manejo más apropiadas un caudal unitario (q) de 2 l/s y una lámina requerida (H_r) de 0,9-SMD mm. En el Cuadro 11 se puede apreciar el efecto que tiene en el proceso de optimización un bajo coste del agua y no penalizar las pérdidas, tendiendo a obtener un rendimiento de cosecha muy alto a costa de aplicar numerosos riegos con grandes pérdidas, principalmente debidas a la percolación. El modo de obtener un rendimiento próximo al potencial es evitando que el cultivo sufra estrés hídrico. Esta es la tendencia del proceso de optimización, dando un pequeño riego a principios de mayo para aumentar la frecuencia y la lámina en los meses de mayor demanda hídrica y mayor coeficiente de respuesta productiva.

En cuanto al Cuadro 12, el hecho de regar cuando el déficit de humedad supera al agua útil supone un mayor agotamiento de la reserva hídrica del suelo que conduce a un primer riego más tardío y a un mayor intervalo de tiempo entre riegos consecutivos. En definitiva, supone la aplicación de un menor número de riegos con mayor lámina requerida. Por otra parte, la aplicación de riegos deficitarios conlleva una reducción notable de la producción del cultivo, aunque permite alcanzar buenos rendimientos de aplicación debido a la reducción de las pérdidas por percolación. En cualquier caso, a pesar de que el rendimiento de aplicación medio alcanzado según el criterio de optimización es aproximadamente la mitad del logrado según el criterio de agua útil, la optimización supone un aumento del beneficio neto en torno al 13 por ciento. Otro aspecto destacable es que el mejor resultado se ha obtenido empleando un módulo de aplicación similar al proporcionado según el criterio de optimización.

Cuadro 11
Programación según criterio de optimización

Coste agua: 0,756	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Coste Esc.: 0	7/5	1	24	2,3	0,20	0,11	0,70	0,34
Coste Per.: 0	28/5	2	38	2,3	0,40	0,12	0,49	0,49
Ben.neto: 274.053	4/6	3	38	2	0,25	0,10	0,65	0,43
Y: 11.906	11/6	4	38	2,3	0,35	0,12	0,53	0,49
Coste: 23.599	18/6	5	66	2,3	0,34	0,18	0,48	0,70
	25/6	6	66	2	0,35	0,15	0,50	0,64
	2/7	7	52	2,3	0,44	0,14	0,42	0,61
	9/7	8	59	2,3	0,41	0,16	0,43	0,66
	16/7	9	59	2	0,40	0,14	0,46	0,59
	23/7	10	59	2,3	0,44	0,16	0,40	0,66
	30/7	11	59	2	0,39	0,14	0,48	0,59
	6/8	12	66	2	0,35	0,15	0,50	0,64
	13/8	13	52	2	0,39	0,12	0,49	0,55
	20/8	14	38	2,3	0,44	0,12	0,44	0,49

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12
Programación según criterio de agua útil
(SMD > AU; H = 0,9 SMD)

Coste agua: 0,756	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Coste Esc.: 0	13/6	1	97,2	2	0,65	0,24	0,11	0,77
Coste Per.: 0	27/6	2	90,2	2	0,65	0,22	0,13	0,75
Ben.neto: 242.886	10/7	3	88,4	2	0,65	0,22	0,14	0,74
Y: 10.215	22/7	4	86,9	2	0,64	0,21	0,15	0,74
Coste: 12.477	4/8	5	89,0	2	0,65	0,21	0,14	0,74
	19/8	6	95,4	2	0,65	0,23	0,12	0,77

Fuente: Elaboración propia.

VI.3. Sensibilidad del modelo a los precios del agua

En los últimos años ha crecido la preocupación sobre la presencia cada vez mayor de contaminantes agroquímicos en las aguas subterráneas. Destacan los nitratos, que son arrastrados por el agua que drena durante el riego por debajo de la zona radicular del cultivo. En Estados Unidos se ha estimado que cada ha-m de agua percolada arrastra aproximadamente 177-220 kg de nitrógeno (USDA, 1983). El riego por superficie es el sistema de aplicación que provoca más percolación profunda y, por tanto, de mayor riesgo

de contaminación de acuíferos. Los volúmenes de escorrentía y percolación derivados del riego por surcos dependen de las variables de diseño: longitud y geometría del surco, separación entre surcos y pendiente de los mismos. También dependen de las variables de manejo del riego como el módulo unitario y el tiempo de aplicación y de las características de infiltración del suelo. Para el análisis de sensibilidad se han tomado los mismos datos de clima, suelo y cultivo que en el ejemplo del apartado VI.2. Los intervalos de costes para la escorrentía y percolación se han tomado de Reddy (1994).

VI.3.1. Sensibilidad al coste del agua de riego

Para estudiar el efecto de diferentes costes de agua sobre el beneficio obtenido con el cultivo de maíz, el coste del agua ha tomado valores entre 1 y 26 ptas/m³ con incrementos de 5. El resto de coeficientes de coste se han fijado a: 900 ptas/ha/riego (mano de obra), 10 ptas/m³ (escorrentía) y 10 ptas/m³ (drenaje). Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 13.

En primer lugar, al aumentar el precio del agua aumenta el coste de aplicación de los riegos, disminuyendo el beneficio neto obtenido hasta pasar a pérdidas (beneficio negativo) cuando el agua vale 26 ptas/m³. En este caso habría que buscar cultivos de mayor beneficio. La disminución del beneficio también se debe a un menor rendimiento de cosecha, consecuencia del mayor estrés hídrico al que se somete al cultivo por la menor cantidad de agua aplicada (577 mm para un coste de 1 ptas/m³ frente a 449 mm para un coste de 26 ptas/m³). El número de riegos disminuye notablemente, pasando de 8 a 5, compensándose ligeramente con un aumento de la lámina aplicada en cada uno. Este contraste es aún más marcado cuando no se penalizan las pérdidas, Cuadro 16, donde para un coste de 1 ptas/m³ se aplican 669 mm en 13 riegos, frente a los 501 mm aplicados en 6 riegos para un coste del agua de 16 ptas/m³. En todas las pruebas la mayor frecuencia de riegos corresponde a julio. Esto es debido a que este es el mes de mayor demanda hídrica ya que coincide que el cultivo se encuentra en fase de madurez, tomando el coeficiente de cultivo su valor máximo, y la evapotranspiración de referencia es la máxima del año.

Es de destacar el alto rendimiento de aplicación alcanzado cuando se penalizan las pérdidas, estando por encima de la media cuando el precio del agua es mayor. Esto es debido a una disminución apreciable del agua percolada. Sin embargo, el módulo de aplicación y el coeficiente de escorrentía se muestran bastante insensibles al coste del agua. Lo mismo le ocurre a la uniformidad de distribución, manteniéndose en torno a 0,75. Por el contrario, cuando no se penalizan las pérdidas y el agua resulta barata, 1 ptas/m³, pierde importancia el rendimiento de aplicación, tomando un valor medio de 0,4, y la gana el rendimiento de cosecha, aproximándose al potencial (13.000 kg/ha). Además, el agua se aplica con láminas más bien pequeñas que dan lugar a grandes pérdidas por percolación. Esto se puede solventar penalizando las pérdidas de este tipo (Cuadro 15). En este caso, la mejora del rendimiento de aplicación es sustancial, pasando a tomar un valor medio

próximo a 0,8, pero el rendimiento de cosecha disminuye notablemente, en torno a 2.000 kg/ha.

VI.3.2. Sensibilidad al coste del agua de escorrentía

La sensibilidad al coste del sistema de recogida de escorrentía se ha analizado para los siguientes valores de agua de escorrentía: 6, 10, 15, 20 y 30 ptas/m³. En este caso, el coste del agua de riego se fija a 1 pta/m³ y el resto de coeficientes de costes se mantienen constantes como se indicaron en el apartado anterior. Los resultados se muestran en el Cuadro 14.

Conforme aumenta el coste de la escorrentía, se aprecia una disminución del módulo de aplicación. Esto hace que descendan las pérdidas en cola del surco, permitiendo mantener alto el beneficio neto obtenido, sufriendo tan sólo una caída del 18 por ciento cuando el coste del agua de escorrentía se multiplica por cinco. El rendimiento de cosecha es muy similar en todos los casos ya que hay muy poca diferencia en cuanto a lámina total aplicada, debiéndose la disminución del beneficio a un aumento del coste. Por otro lado, el hecho de regar con caudales menores hace que aumenten el tiempo de aplicación y las pérdidas por percolación, así, el coeficiente de percolación medio aumenta en torno a un 11 por ciento para los costes extremos. El rendimiento de aplicación toma un valor medio aproximado de 0,6 y se muestra insensible al coste del agua de escorrentía, ya que la disminución del coeficiente de escorrentía es compensada con el aumento del de percolación. Lo mismo le ocurre al número de riegos y a la dosis aplicada en cada uno.

VI.3.3. Sensibilidad al coste del agua de percolación

Se ha analizado para valores de agua de percolación entre 6 y 40 ptas/m³, como se muestra en el Cuadro de resultados (Cuadro 15). En este caso el coste del agua de riego se fija en 1 pta/m³ y el del agua de escorrentía en 10 ptas/m³.

Al igual que en el apartado anterior, un gran aumento del coste del drenaje supone un descenso relativamente bajo del beneficio. La explicación es una alta sensibilidad del coeficiente de percolación al coste del agua de drenaje, pasando de un valor medio de 0,25 (para 6 ptas/m³) a 0,01 (para 40 ptas/m³) que supone la práctica eliminación de la percolación. Esto es posible mediante la aplicación de caudales mayores, el valor medio está sobre 2,3 l/s, y láminas de riego ligeramente deficitarias. A diferencia del apartado anterior, a medida que aumenta el coste del drenaje se compensa una menor producción del cultivo con la reducción del coste. Por otro lado, el empleo de caudales mayores hace que aumente ligeramente el coeficiente de escorrentía. En cualquier caso, esta subida es compensada con creces por la bajada producida en el coeficiente de percolación, lo que explica los altos rendimientos de aplicación conseguidos para los mayores costes de la percolación. Pasando de 0,59 (para 6 ptas/m³) a 0,8 (para 30 y 40 ptas/m³).

En cuanto al calendario de riegos, la tónica general es que el primer riego corresponda a finales de mayo o principios de junio y el último a finales de agosto. De este modo, se cumple el requerimiento de déficit mínimo al final de la campaña, que permitirá proceder a la recogida de la cosecha sin dificultades.

Cuadro 13
Sensibilidad al coste del agua de riego

Coste agua: 1	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 216.147	4/6	1	73	2,3	0,55	0,20	0,25	0,73
Y: 10.821	18/6	2	73	2,3	0,59	0,20	0,21	0,73
Coste: 54.385	2/7	3	94	2,3	0,60	0,27	0,13	0,81
	16/7	4	66	2,3	0,80	0,18	0,02	0,70
	23/7	5	80	2,3	0,62	0,22	0,15	0,76
	30/7	6	59	2,3	0,51	0,16	0,33	0,66
	13/8	7	66	2,3	0,76	0,18	0,06	0,70
	20/8	8	66	2,3	0,59	0,18	0,22	0,70
Coste agua: 6	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 166.505	4/6	1	73	2,3	0,55	0,20	0,25	0,73
Y: 10.690	18/6	2	80	2,3	0,54	0,22	0,23	0,76
Coste: 100.737	2/7	3	94	2,3	0,57	0,27	0,16	0,81
	16/7	4	101	1,7	0,56	0,20	0,24	0,74
	30/7	5	101	1,7	0,56	0,20	0,24	0,74
	13/8	6	94	2,3	0,56	0,27	0,17	0,81
Coste agua: 11	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 121.795	4/6	1	66	2,3	0,59	0,18	0,23	0,70
Y: 10.310	18/6	2	73	2,3	0,63	0,20	0,17	0,73
Coste: 135.948	2/7	3	101	1,7	0,59	0,20	0,22	0,74
	16/7	4	101	1,7	0,58	0,20	0,23	0,74
	30/7	5	80	2,3	0,71	0,22	0,07	0,76
	13/8	6	101	1,7	0,64	0,20	0,16	0,74
Coste agua: 16	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 76.699	11/6	1	101	1,7	0,58	0,19	0,23	0,74
Y: 9.613	2/7	2	108	1,7	0,71	0,21	0,08	0,76
Coste: 163.619	16/7	3	101	1,7	0,68	0,19	0,13	0,74
	30/7	4	101	1,7	0,66	0,19	0,15	0,74
	13/8	5	80	2,3	0,74	0,22	0,04	0,76
Coste agua: 21	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 37.166	11/6	1	80	2,3	0,71	0,22	0,07	0,76
Y: 9.459	25/6	2	108	1,4	0,57	0,16	0,27	0,70
Coste: 199.311	9/7	3	80	2,3	0,68	0,22	0,09	0,76
	23/7	4	101	1,7	0,66	0,19	0,14	0,74
	6/8	5	101	1,7	0,63	0,19	0,18	0,74
Coste agua: 26	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: -711	18/6	1	108	1,7	0,73	0,21	0,06	0,76
Y: 8.827	2/7	2	80	2,3	0,78	0,22	0,00	0,76
Coste: 221.397	16/7	3	101	1,7	0,73	0,19	0,07	0,74
	30/7	4	80	2,3	0,78	0,22	0,00	0,76
	6/8	5	80	2,3	0,64	0,22	0,13	0,76

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14
Sensibilidad al coste del agua de escorrentía

Coste Esc.:6	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 222.757	4/6	1	73	2,3	0,54	0,20	0,25	0,73
Y: 10.709	18/6	2	80	2,3	0,54	0,22	0,24	0,76
Coste: 44.961	2/7	3	80	2,3	0,66	0,22	0,12	0,76
	16/7	4	80	2,0	0,74	0,19	0,07	0,71
	23/7	5	80	2,3	0,57	0,22	0,20	0,76
	6/8	6	101	2,3	0,55	0,29	0,16	0,83
	20/8	7	73	2,3	0,68	0,20	0,12	0,73
Coste Esc.: 10	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 216.147	4/6	1	73	2,3	0,55	0,20	0,25	0,73
Y: 10.821	18/6	2	73	2,3	0,59	0,20	0,21	0,73
Coste: 54.385	2/7	3	94	2,3	0,60	0,27	0,13	0,81
	16/7	4	66	2,3	0,80	0,18	0,02	0,70
	23/7	5	80	2,3	0,62	0,22	0,15	0,76
	30/7	6	59	2,3	0,51	0,16	0,33	0,66
	13/8	7	66	2,3	0,76	0,18	0,06	0,70
	20/8	8	66	2,3	0,59	0,18	0,22	0,70
Coste Esc.: 15	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 205.857	4/6	1	66	2,3	0,59	0,18	0,23	0,70
Y: 10.663	18/6	2	52	2,3	0,76	0,14	0,10	0,61
Coste: 60.707	25/6	3	52	2,3	0,71	0,14	0,15	0,61
	2/7	4	66	2,3	0,60	0,18	0,22	0,70
	16/7	5	66	2,3	0,81	0,18	0,01	0,70
	23/7	6	94	1,7	0,54	0,18	0,28	0,72
	6/8	7	94	1,7	0,57	0,18	0,25	0,72
	20/8	8	73	2,3	0,69	0,20	0,11	0,73
Coste Esc.: 20	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 195.455	4/6	1	73	2,3	0,54	0,20	0,25	0,73
Y: 10.544	18/6	2	59	2,3	0,67	0,16	0,17	0,66
Coste: 69.144	2/7	3	87	1,4	0,67	0,12	0,22	0,62
	9/7	4	66	2,3	0,59	0,18	0,23	0,70
	23/7	5	108	1,1	0,54	0,10	0,36	0,62
	6/8	6	73	2,3	0,72	0,20	0,07	0,73
	13/8	7	73	2,3	0,53	0,20	0,27	0,73
Coste Esc.: 30	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 181.900	4/6	1	66	2,3	0,59	0,18	0,23	0,70
Y: 10.625	18/6	2	80	1,7	0,55	0,14	0,30	0,66
Coste: 83.715	2/7	3	94	1,4	0,56	0,13	0,31	0,65
	16/7	4	80	1,4	0,64	0,11	0,25	0,59
	23/7	5	73	1,7	0,52	0,13	0,35	0,63
	6/8	6	80	1,7	0,66	0,14	0,19	0,66
	13/8	7	66	2,3	0,53	0,18	0,28	0,70

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 15
Sensibilidad al coste del agua de percolación

Coste Per.:6	Fecha	Riego	H	Q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 223.704	28/5	1	45	2,3	0,48	0,13	0,39	0,55
Y: 10.981	11/6	2	66	2,3	0,52	0,18	0,30	0,70
Coste: 50.825	25/6	3	66	2,3	0,72	0,18	0,10	0,70
	2/7	4	66	2,3	0,58	0,18	0,24	0,70
	16/7	5	108	1,4	0,55	0,16	0,30	0,70
	23/7	6	52	2,3	0,47	0,14	0,39	0,61
	6/8	7	66	2,3	0,77	0,18	0,05	0,70
	13/8	8	59	2,3	0,67	0,16	0,17	0,66
	20/8	9	52	2,3	0,59	0,14	0,27	0,61
Coste Per.: 10	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 216.147	4/6	1	73	2,3	0,55	0,20	0,25	0,73
Y: 10.821	18/6	2	73	2,3	0,59	0,20	0,21	0,73
Coste: 54.385	2/7	3	94	2,3	0,60	0,27	0,13	0,81
	16/7	4	66	2,3	0,80	0,18	0,02	0,70
	23/7	5	80	2,3	0,62	0,22	0,15	0,76
	30/7	6	59	2,3	0,51	0,16	0,33	0,66
	13/8	7	66	2,3	0,76	0,18	0,06	0,70
	20/8	8	66	2,3	0,59	0,18	0,22	0,70
Coste Per.: 15	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 207.039	4/6	1	66	2,3	0,59	0,18	0,23	0,70
Y: 10.495	18/6	2	80	2,3	0,58	0,22	0,20	0,76
Coste: 55.339	2/7	3	94	2,3	0,59	0,27	0,14	0,81
	16/7	4	87	2,3	0,66	0,25	0,09	0,79
	30/7	5	73	2,0	0,79	0,17	0,04	0,67
	6/8	6	80	2,3	0,61	0,22	0,16	0,76
	20/8	7	73	2,3	0,73	0,20	0,07	0,73
Coste Per.: 20	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 203.165	4/6	1	59	2,3	0,63	0,16	0,21	0,66
Y: 10.145	18/6	2	73	2,3	0,67	0,20	0,13	0,73
Coste: 50.450	2/7	3	52	2,3	0,86	0,14	0,00	0,61
	9/7	4	66	2,3	0,79	0,18	0,03	0,70
	16/7	5	52	2,3	0,78	0,14	0,07	0,61
	23/7	6	59	2,3	0,73	0,16	0,11	0,66
	6/8	7	52	2,3	0,86	0,14	0,00	0,61
	13/8	8	94	2,3	0,66	0,27	0,07	0,81
	27/8	9	45	2,3	0,86	0,13	0,01	0,55
Coste Per.: 30	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 199.588	11/6	1	80	2,3	0,71	0,22	0,07	0,76
Y: 9.706	25/6	2	87	2,3	0,7	0,25	0,05	0,79
Coste: 43.056	9/7	3	59	2,3	0,84	0,16	0	0,66
	16/7	4	80	2,3	0,72	0,22	0,06	0,76
	30/7	5	73	2,3	0,8	0,2	0	0,73
	6/8	6	59	2,3	0,79	0,16	0,05	0,66
	20/8	7	80	2,3	0,78	0,22	0	0,76
Coste Per.: 40	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Ben.neto: 194.697	18/6	1	108	2,0	0,70	0,27	0,03	0,80
Y: 9.412	2/7	2	87	2,3	0,74	0,25	0,01	0,79
Coste: 40.604	16/7	3	80	2,0	0,80	0,19	0,01	0,71
	23/7	4	52	2,6	0,81	0,19	0,00	0,62
	6/8	5	80	2,0	0,81	0,19	0,00	0,71
	13/8	6	66	2,3	0,77	0,18	0,05	0,70

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16
Sensibilidad al coste del agua sin penalizar las pérdidas

Coste agua: 1	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Coste Esc.: 0	7/5	1	17	2,6	0,20	0,14	0,66	0,25
Coste per.: 0	28/5	2	38	2,3	0,40	0,12	0,49	0,49
Ben.neto: 269.739	11/6	3	66	2,3	0,50	0,18	0,32	0,70
Y: 11.790	18/6	4	66	2,3	0,34	0,18	0,48	0,70
Coste: 25.009	25/6	5	59	2,3	0,40	0,16	0,44	0,66
	2/7	6	52	2,3	0,44	0,14	0,42	0,61
	9/7	7	52	2,6	0,43	0,19	0,38	0,62
	16/7	8	59	2	0,40	0,14	0,46	0,59
	23/7	9	59	2,3	0,44	0,16	0,40	0,66
	30/7	10	52	2,3	0,45	0,14	0,41	0,61
	6/8	11	52	2,6	0,42	0,19	0,39	0,62
	13/8	12	66	2,3	0,36	0,18	0,46	0,70
	20/8	13	31	2,3	0,47	0,11	0,42	0,42
Coste agua: 16	Fecha	Riego	H	q	Ra	Ce	Cp	UD
Coste Esc.: 0	4/6	1	73	2,3	0,54	0,20	0,25	0,73
Coste Per.: 0	18/6	2	80	2,3	0,54	0,22	0,24	0,76
Ben.neto: 216.147	2/7	3	94	1,7	0,56	0,18	0,26	0,72
Y: 10.821	16/7	4	94	2,3	0,60	0,27	0,13	0,81
Coste: 54.385	23/7	5	59	2,3	0,50	0,16	0,34	0,66
	6/8	6	101	1,7	0,55	0,19	0,26	0,74

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VII

CONCLUSIONES

VII. CONCLUSIONES

El modelo estacional de riego por surcos desarrollado en este trabajo permite obtener soluciones óptimas en cuanto a manejo y programación del riego por surcos mediante el empleo de los algoritmos genéticos, penalizando el contenido de humedad del suelo sobrante al final de la campaña y las pérdidas por escorrentía y percolación. La elección de penalizaciones altas para las pérdidas, principalmente para el agua percolada, conduce a un menor beneficio debido a una merma del rendimiento productivo, alcanzando altos rendimientos de aplicación que suponen un uso mucho más eficiente del agua y una disminución del daño ambiental, producido principalmente por la lixiviación de nitrógeno. Por el contrario, no considerar el coste que suponen las pérdidas conduce a unos rendimientos de aplicación mucho más bajos pero a un mayor beneficio, no teniendo en cuenta el efecto perjudicial sobre el suelo y las aguas subterráneas a medio y largo plazo. Por tanto, el uso del modelo con las consideraciones ambientales es una herramienta que permite un desarrollo sostenido y una mejora en el uso eficiente del agua.

El modelo es aplicable a una parcela y tiene carácter integral, es decir, analiza toda la campaña en su conjunto. Mediante los tres submodelos empleados se simula la evolución del estado de humedad del suelo, de cada riego y de la respuesta productiva del cultivo. Por otra parte, aunque aquí se ha aplicado al maíz, es un modelo abierto, válido para cualquier cultivo, clima y suelo. Permitiendo elegir, además del proceso de optimización, entre otros criterios de riego comúnmente empleados, como la programación con dosis, caudal e intervalos fijos.

El entorno amigable en el que se ha desarrollado el programa está especialmente indicado para usuarios con escasos conocimientos de informática. Además, los resultados de la simulación son fácilmente manejables y permiten, mediante el módulo creado en Access, múltiples consultas cuyos datos se pueden obtener mediante formularios ya definidos. Por tanto, se recomienda el uso de este programa a agricultores y técnicos de comunidades de regantes. Posibles mejoras de este programa pueden contemplar la consideración de recorte de caudal y la de otros sistemas de riego.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Bar, J e I. Bander. 1996. *El Gran Libro de Access para Windows 95*. Marcombo, Boixareu Editores.
- Benami, A. y A. Ofen. 1983. *Irrigation Engineering*. Irrigation Engineering Scientific Publications (IESP), Haifa.
- Camacho, E. 1993. Caracterización, optimización y manejo del riego por surcos mediante pulsaciones intermitentes. Tesis Doctoral, Depto Agronomía, Universidad de Córdoba.
- Camacho, E.; C. Pérez-Lucena; J. Roldán-Cañas y M. Alcaide. 1997. IPE: Model for management and control of furrow irrigation in real time. *J. Irrig. Drain. Eng. Div.*, 123: 264-269.
- Camacho, E.; A. J. Clemmens y T. S. Strelkoff. 1997. Diseño, manejo y evaluación del riego por surcos. Sin publicar.
- Camacho, E.; J. Roldán y M. Alcaide. 1998a. Apuntes de diseño del riego por surcos. Sin publicar.
- Camacho, E.; J. Roldán y M. Alcaide. 1998b. Apuntes sobre diseño de riego por superficie mediante balance de volumen. Sin publicar.
- C.H.G. 1992-93. Memoria de explotación de la zona regable del Bembézar. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Córdoba.
- Chen, C. L. 1970. Surface irrigation using kinematic-wave method. *J. Irrig. Drain. Div.*, 96: 39-46.
- Cuenca, R.H. 1989. *Irrigation system design. an engineering approach*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Dandy, G.C.; A.R. Simpson y L.J. Murphy. 1996. An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resour. Res.*, 32: 449-458.
- De Juan; J. A.; J. M. Tarjuelo; M. Valiente y P. García. 1996. Model for optimum cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. I: Development of a decision model. *Agric. Water Management*, 31: 115-143.
- Doorenbos, J. y A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Estudios FAO sobre Riego y Drenaje N° 33.

Elliott, R. L.; W. R. Walker y G. V. Skogerboe. 1982. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. *J. Irrig. Drain. Div.*, 108: 179-195.

Galante, M. 1993. Un Algoritmo Genético Simple para la Optimización de Estructuras Planas Articuladas. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, Vol.9, N° 2: 179-199.

García-Guzmán, A. 1997. Algoritmos Genéticos. Apuntes de clase sin publicar.

Gardner, W. y C. W. Lauritzen. 1946. Erosion as a function of the size of the irrigating stream and the slope of the eroding surface. *Soil Sci.* 62: 233-242.

Getisa. 1992. Evaluación de los regadíos de Andalucía. Directrices para un plan de modernización de los regadíos andaluces. IARA. Junta de Andalucía.

Giménez, J. L. 1996. Aplicación de los modelos de riego por superficie a la optimización y a la elaboración de diagramas de manejo. Trabajo profesional fin de carrera, Dept. Agronomía, Universidad de Córdoba.

Goldberg, D. E. 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Hargreaves, G.L.; G.H. Hargreaves y J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for the Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 111: 113-124.

Hart, W.E.; D.I. Norum y G. Perl. 1981. Optimal seasonal irrigation application analysis. *J. Irrig. Drain. Div.*, 106: 221-235.

Holzapfel, E.A.; M.A. Mariño y J. Chavez-Morales. 1986. Surface irrigation optimization models. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112:1-19.

Holzapfel, E.A. y M.A. Mariño. 1987. Surface-irrigation nonlinear optimization models. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 113: 379-391.

International Commission on Irrigation and Drainage. 1980. Land reclamation. ICID 29:1.

Israelsen, O. W.; V. E. Hansen y G. E. Stringham. 1980. *Irrigation. Principles and practices*. 4ª Ed., John Wiley & Sons. New York.

James, L.G. 1988. *Principles of farm irrigation systems design*. John Wiley & Sons, New York.

Jensen, M. E. 1968. *Water consumption by agricultural plants, Vol. II*. Academic Press, New York.

Jensen, M. E. y D. F. Heermann. 1970. Meteorological approaches to irrigation scheduling. *Proc., Nat. Irrig. Symp.*, NN1-NN10.

Jensen, M.E.; J.L. Wright y B.J. Pratt. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Trans. ASAE*: 954-959.

Katapodes, N. D. y T. Strelkoff. 1997. Dimensionless solution of border irrigation advance. *J. Irrig. Drain. Div.*, 103: 401-407.

Kincaid, D. C. y D. F. Heermann. 1974. Scheduling with programmable calculator. *ARS-NC-12. Agric. Res. Service*.

Koluek, P. K.; K. K. Tanji y T. J. Trout. 1993. Overview of soil erosion from irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 119: 929-946.

Kuester, J. L. y J. H. Mize. 1973. *Optimization techniques*. McGraw-Hill Book Company, New York.

Letey, J.; H.J. Vaux Jr. y E. Feinerman. 1984. Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. *Agron. J.*, 76: 435.

Losada, A.; J. Roldán ; M. Alcaide y L. Juana. 1992. *Manual de Prácticas de Hidráulica y de Riegos*. Universidad de Córdoba.

Losada, A. 1992. *Riegos. Fundamentos Hidrológicos. Métodos de aplicación*. E.T.S.I.A., Universidad Politécnica de Madrid.

Mannochi, F. y P. Mecarelli. 1994. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120: 484-503.

Mantovani, E.C.; F.J. Villalobos; F. Orgaz; J. Berengena y E. Fereres. 1992a. A comparison of methods to calculate evapotranspiration of field crops. *Second Congress European Society for Agronomy*. Warwicks, Reino Unido. Agosto 1992.

Mantovani, E.C.; F. Orgaz; F.J. Villalobos y E. Fereres. 1992b. Evaluación de un método para la determinación de la evaporación y la transpiración del algodón en Córdoba. X Jornadas Técnicas de Riegos. Albacete, 26-27 Mayo, 1992.

Marjai, G.; I. Oroszlany y P. Wellish. 1958. An investigation into the rate of water application in case of furrow irrigation. *Vizugyi Kozlemenyek*, 3: 205-229 (Húngara).

Montesinos, M^a. P. 1995. Modelo matemático para el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. Tesis Doctoral. Dept. Agronomía, Universidad de Córdoba.

Montesinos, M^a.P.; A. García-Guzmán y J.L. Ayuso. 1997. Aplicación de un algoritmo genético a la optimización de redes de distribución de agua. Actas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, Ed. A. Martín Navarro, Sevilla.

Nagaraju Kumar, C.; N. Indrasenan y K. Elango. 1998. Nonlinear Programming Model for Extensive Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124: 123-126.

Nugteren, J. 1973. Physical-mathematical features of field irrigation. *J. Irrig. Drain. Div.*, 98: 335-346.

Raghuwanshi, N.S. y W.W. Wallender. 1994. Stochastic seasonal furrow irrigation model. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 94-2021.

Raghuwanshi, N.S. y W.W. Wallender. 1997. Economic optimization of furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 123: 377-385.

Rayej, M. y W. W. Wallender. 1987. Runoff recovery and evaporation pond optimization model. *Trans. ASAE*, 30: 1031-1042.

Reca, J. 1997. Mejora de la eficiencia del uso del agua dentro de un plan de modernización de los regadíos andaluces. Tesis Doctoral, Deptº Agronomía. Universidad de Córdoba.

Reddy, J.M. y W. Clyma. 1981. Optimal design of furrow irrigation systems. *Trans. ASAE*, 617-623.

Reddy, J.M. y W. Clyma. 1983 a. Optimizing furrow irrigation runoff recovery systems. *Trans. ASAE*, 4: 1050-1056, 1063.

Reddy, J.M. y W. Clyma. 1983 b. Choosing optimal design depth for surface irrigation systems. *Agric. Water Managmt.* 6: 335-349.

Reddy, J.M. y H. Apolayo. 1991. Sensitivity of furrow irrigation system cost and design variables. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 117: 201-219.

Reddy, J..M. 1994. Optimization of furrow irrigation system design parameters considering drainage and runoff water quality constraints. *Irrig. Sci.*, 15: 123-136.

Reina, A. 1998. Ecuaciones de infiltración en un riego por superficie y utilización de un sistema automático de adquisición de datos. Trabajo profesional fin de carrera. Dept. Agronomía, Universidad de Córdoba.

Ritzel, B. y J. W. Eheart. 1994. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. *Water Resour. Res.*, 30: 1589-1603.

Sánchez de la Orden, M. 1992. *Topografía y Fotogrametría Práctica*. E.T.S.I.A.M., Universidad de Córdoba.

Smith, M. 1990. Manual del Cropwat. Versión 5.7. F.A.O. Roma.

Stewart, J. I. y R. M. Hagan. 1993. Function to predict effects of crop water deficits. *J. Irrig. Drain. Div.*, 99: 421-439.

Strelkoff, T. S. y N. D. Katapodes. 1977. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. *J. Irrig. Drain. Div.*, 103: 325-342.

Tarjuelo, J. M.; J. A. De Juan; M. Valiente y P. García. 1997. Model for optimum cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II: A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agric. Water Managmt.*, 31: 145-163.

United States Department of Agriculture. 1983. Furrow irrigation. Chap. 5, Sect. 15. Soil Conservation Service National Engineering Handbook, USDA, Washington, DC.

Valiantzas, J. D. 1997 a. Surface irrigation advance equation: variation of subsurface shape factor. *J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 123: 300-306.

Valiantzas, J. D. 1997 b. Volume balance irrigation advance equation: variation of surface shape factor. *J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 123: 307-312.

Villalobos, F. J. 1993. Los Servicios de asesoramiento de riegos y las necesidades hídricas de los cultivos. *Riegos y Drenajes*, XXI/71/1993.

Walker, W. R. y G. U. Skogerboe. 1987. *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice Hall.

Wallender, W.W. y M. Rayej. 1987. Economic optimization of furrow irrigation with uniform and nonuniform soil. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 30: 1425-1429.

Wallender, W.W.; S. Ardila y M. Rayej. 1990. Irrigation optimization with variable water quality and nonuniform soil. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 33: 1605-1611.

Wang, Q.J. 1991. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.*, 27: 2467-2471.

Woolhiser, D. A. y J. A. Liggett. 1967. Unsteady, one dimensional flow over a plane. The rising hydrograph. *Water Resour. Res.*, 3: 753-771.

Wu, I-Pai y T. Liang. 1970. Optimal design of furrow length of surface irrigation. *J. Irrig. Drain. Div.*, 96: 319-332.

Yitayew, M.; J. Letey; H..J. Vaux y E. Feinerman. 1985. Factors affecting uniformity and optimal water management with furrow irrigation. *Irrig. Sci.*, 6: 201-210.

ANEXOS

Anexo I: Datos experimentales de campo

1. Datos de la sección del surco

Cuadro 17
Datos de la sección del surco de riego

Y(m)	B(m)	A(m ²)	WP(m)
0,01	0,096	0,0005	0,0981
0,02	0,128	0,0016	0,1358
0,03	0,158	0,0030	0,1719
0,04	0,188	0,0048	0,2079
0,05	0,216	0,0068	0,2423
0,06	0,242	0,0091	0,2751
0,07	0,272	0,0116	0,3112
0,08	0,298	0,0145	0,3440
0,09	0,326	0,0176	0,3784
0,10	0,354	0,0210	0,4128
0,11	0,39	0,0247	0,4540
0,12	0,426	0,0288	0,4952
0,13	0,49	0,0334	0,5622

Fuente: Elaboración propia.

2. Ensayos de infiltración

Cuadro 18
Pruebas de infiltración

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
t(min)	z(mm)	t(min)	z(mm)	t(min)	z(mm)	t(min)	z(mm)
1	12	0,5	8	0,5	7	0,5	7,5
2	15	1	12	1	11	1	11
3	18	2	15	2	15,5	2	16
4	20,5	3	18	3	18,5	3	19
5	22,5	4	21	5	24	4	22
7	27	5	23	7	29	5	25
10	31	10	32	10	34	15	44
20	43,5	15	40	15	42	25	57
30	53	30	55	25	54	45	76
45	65	45	67	45	71,5	65	92
60	74	70	83	70	91	95	112
90	90	105	100	100	109	125	132
120	106	115	109	130	124		
		125	118	160	139		
		135	127				

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del ajuste potencial de cada una de las pruebas es el siguiente:

$$\text{Prueba 1: } Z = 10,5 \cdot t^{0,47}$$

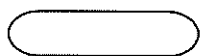
$$\text{Prueba 2: } Z = 10,8 \cdot t^{0,48}$$

$$\text{Prueba 3: } Z = 10,9 \cdot t^{0,50}$$

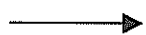
$$\text{Prueba 4: } Z = 11 \cdot t^{0,51}$$

Anexo II: Organigrama general del modelo

1. Simbología empleada en el organigrama.



Señala los puntos de comienzo y terminación



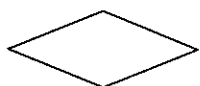
Línea de flujo



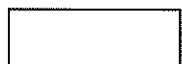
Conector de líneas de flujo



Ejecución de un proceso predefinido



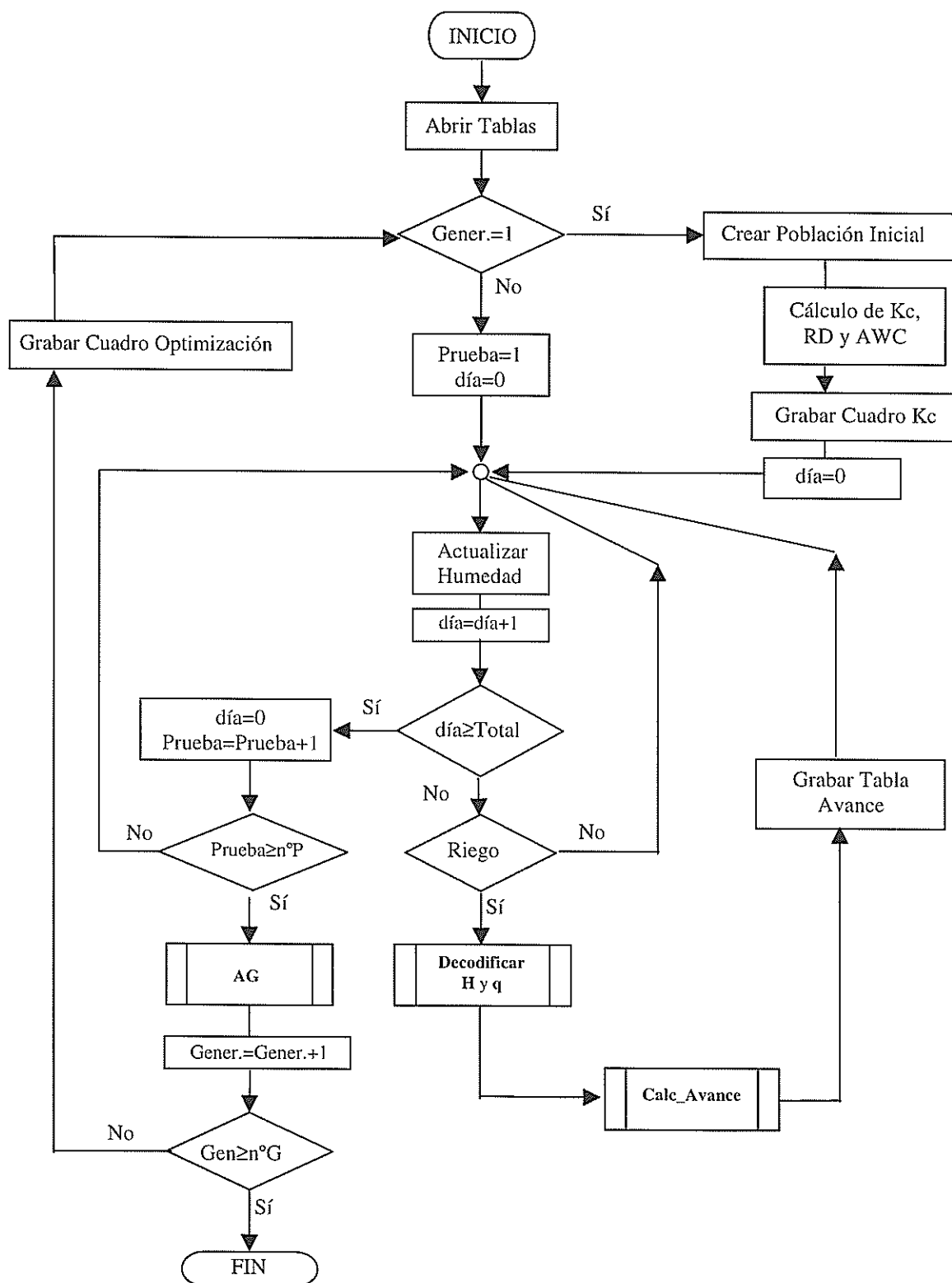
Esquema de decisión dicotómica



Instrucción o proceso

2. Organigrama general del modelo de Optimización

Gráfico 16
Organigrama general del modelo de Optimización



Anexo III: Manual de OPTIMEC

Tras instalar el programa *OPTIMEC*, el usuario se encontrará con la pantalla principal (gráfico 17). En ésta, se presentan una serie de botones para que se defina la opción de simulación deseada, un riego o una campaña. Si se elige ésta última, se activarán las distintas opciones que corresponden a los posibles criterios de riego (V.1.1.5.) y al modo de definir el coste del agua. En el caso de optar por la optimización mediante algoritmos genéticos, además, es necesario especificar el método de selección de los individuos. En cualquier caso, se ha facilitado la entrada de datos mediante la activación de las distintas cajas en función de las opciones seleccionadas. Así por ejemplo, si el criterio de riego no es el de optimización, todas las cajas relativas a datos sobre optimización estarán apagadas e inhabilitadas, de modo que no distraigan la atención del usuario, quien sólo deberá actualizar las que estén activadas. Además, en muchas de ellas aparece un mensaje aclaratorio cuando se detiene el cursor sobre la caja y otras sólo admiten datos que cumplan unas determinadas condiciones, por ejemplo, cuando se opta por el criterio de optimización el número de individuos debe ser par y menor que mil. Esta pantalla presenta también dos listas desplegables, *Cultivo* y *Localidad datos clima*, para que el usuario elija el cultivo y la localidad a la que se refieren los datos de ET_0 , y dos botones en la esquina inferior derecha, uno para salir de la aplicación, *Salir*, y otro para proceder a la ejecución, *Calcular*. Por último, en la esquina superior izquierda hay un pequeño menú que incluye opciones correspondientes a *Archivos* y a *Visualizar*. Se describirá brevemente puesto que los distintos datos y cuadros ya se han explicado en el apartado VI.1.1.

Gráfico 17
Pantalla inicial de OPTIMEC

OPTIMEC: Optimización Económica del riego por surcos mediante Alg. Genético.

Archivos Visualizar

Simular

☐ Un riego Dosis mínima(mm) 10 Precisión de cálculo (en minutos) 30
☒ Una campaña Caudal mínimo(l/s) 0.5 Déficit día anterior (mm) 0

☐ Regar cuando SMD >= AU
☐ Regar cuando SMD >= 0
☐ Intervalo fijo cada (días) 0

☐ Dosis según porcentaje SMD 100

Optimización

Método

☐ Selección
☒ Ordenación

n0 (en %) 5 Pmut 0.005 Penalización por déficit (ptas/mm) 1000
 Pesc 0 Pper 0 Pmo 900

Cultivo Localidad datos clima

MAZ CORDOBA

Nº de generaciones 5 Nº de individuos 10

Definición del precio del agua

☐ Por ptas/m3
☒ Según coste energía

Ptas/m3 1 Ptas/kwh 12 Altura manométrica (m) 15 Rend. motor (tanto por uno) 0.65

Calcular

Salir

Dentro del menú *Archivos* se pueden visualizar, añadir o modificar los datos correspondientes a las tablas *Clima*, *Suelo* y *Cultivo* (cuadros 4, 5 y 6). En el gráfico 18 aparece la pantalla *Cultivo* una vez que se ha hecho click en el botón *Añadir*, se puede apreciar que todas las cajas de datos están en blanco. Una vez que se hayan introducido los datos correspondientes, el botón *Grabar* sirve para guardarlos y el botón *Borrar* sirve para eliminar el registro correspondiente a esa pantalla. Como se comentó en el apartado VI.1.1, la entrada de datos puede realizarse también desde el archivo *RIEGOS*, actualizándose instantáneamente en *OPTIMEC* y viceversa.

Gráfico 18
Pantalla de datos Cultivo

Cultivo

Cultivo:

Fecha:

RDmin: RDmax: NDef:

D1: D2: D3: D4:

Kc1: Kc3: Kc4:

Ky1: Ky2: Ky3: Ky4:

Ymax:

Precio cosecha A: B:

A y B son coeficientes para el cálculo del Nivel de Agotamiento Permisible, NAP, en función de la ET del cultivo: $NAP = A / (B + ET)$

Tipos de cultivo:	A	B
1. Cebolla, pimienta, patata	2.18	2.33
2. Tomate, guisante, col, platanera	2.75	1.81
3. Melón, trigo, girasol, alfalfa, cítricos, judía	4.03	2.84
4. Maíz, algodón, tabaco, remolacha, soja, sorgo, viña, olivo	5.66	4.28

Record: 1

En el gráfico 19 se muestra la pantalla de introducción de datos *Suelo*. A diferencia de *Cultivo*, *Suelo* solamente tiene un registro que permite la actualización de sus campos mediante el botón *Grabar* o el borrado de los datos que contienen si se hace click en el botón *Borrar*.

En cuanto al menú *Visualizar*, se pueden ver los datos correspondientes a *Un riego* (Cuadro 7), a una *Campaña* (ej. Cuadro 11) o a *Kc Cultivo* (Cuadro 9).

Gráfico 19
Pantalla de datos Suelo

CC (% volumétrico):	38
PMP (% volumétrico):	20
SMDi (mm):	0
SMDf (mm):	90
K (m ³ /m/min ² a):	.0081
a:	.49
n (Manning):	.04
Io (tanto por uno):	.0025
Longitud surcos (m):	180
Separación (m):	.75
Geometría < P1:	.381
P2:	2.777

Valores usuales de P2:
seco Triang.=2.666
seco Trapec.=2.658
seco Parab.=2.704

Grabar Cerrar

Registro: 1

Para finalizar, durante la ejecución del programa aparece una pequeña pantalla para indicar el estado del proceso y un botón que permite su cancelación (gráfico 20). Una vez que el proceso ha finalizado, tras pulsar el botón *aceptar* aparece automáticamente otra pantalla que muestra los datos del riego simulado o de la programación de riegos, dependiendo de la opción elegida en la pantalla inicial.

Gráfico 20
Pantalla Proceso

Procesando

Generación	5/60
Individuo	103/500

Cancelar