

Optimización mediante algoritmos genéticos de la gestión del agua en el regadío

Pedro Carrión

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Castilla-La Mancha
Campus Universitario, s/n
02071 Albacete, España
Tel.: 34-967-59 92 00 ext. 2486; Fax: 34-967-59 92 34
e-mail: pedro.carrion@uclm.es

Eulogio López, José Fernando Ortega y Arturo de Juan

Centro Regional de Estudios del Agua
Universidad de Castilla La Mancha
Campus Universitario, s/n
02071 Albacete, España
Tel.: 34-967-59 93 04 Fax: 34-967-59 92 38
e-mail: eulogio.lopez@uclm.es; jose.ortega@uclm.es; arturo.juan@uclm.es

Resumen

El uso de un recurso como el agua, esencial y escaso, tiene gran trascendencia ambiental, social, económica, política, etc., siendo su adecuada gestión fundamental para conseguir la sostenibilidad de sus aprovechamientos. Para alcanzar ese objetivo, la agricultura actual necesita modelos de ayuda a la toma de decisiones para la gestión y explotación agrícola.

Se presenta un modelo de optimización del plan productivo en una explotación agrícola. El proceso de optimización parte de la curva que relaciona el margen bruto de los cultivos con la lámina bruta de riego descargada por el sistema y busca la alternativa de cultivos y los volúmenes estacionales brutos de riego que maximizan el margen bruto en la explotación en su conjunto.

El modelo se ha aplicado en Castilla La Mancha, concretamente en el Sistema Hidrogeológico 08.29, obteniendo excelentes resultados. Las especies seleccionadas para formar parte de la alternativa de cultivos son las que ofrecen un mayor margen bruto, incluso las que presentan elevados requerimientos hídricos en los años secos.

Las características de nuestro problema, con muchas variables implicadas, un amplio campo de búsqueda de las soluciones y la existencia de un gran número de máximos locales hacen que las técnicas de optimización basadas en los algoritmos evolutivos (genéticos), que guían la búsqueda estocástica de la mejor solución, resulten muy eficientes.

Palabras clave: Algoritmos genéticos, optimización, gestión del agua, toma de decisiones.

USE OF GENETIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF IRRIGATION WATER MANAGEMENT

Summary

The use of a resource like water, essential and scarce has environmental, social, economic, political importance etc., an adequate water management is very important to achieve a sustainable use. To this end, current agriculture need different type of tools, such as models for helping in decision making in the agrarian management and exploitation.

The model presented is based on evolutionary computation and specifically in genetic algorithms. This is an optimisation model for the productive planning in an agrarian exploitation. It starts with a curve that relates the gross margin of crops with the irrigation gross depth discharged by the system. It tries to determine the crop alternative and seasonal gross irrigation volumes that maximize the gross margin for the whole exploitation.

The model was applied in Castilla La Mancha region, in the Hydro-geological System 08.29, obtaining excellent results. The species chosen for crop alternative offer the highest gross margins, even those that need high water requirements and dry years. Main characteristics of our problem, such as high number of decision variables, large search space with a great number of local solutions, have lead us to the use of genetic algorithms which are very efficient in the search of the best solution.

Key words: *Genetic algorithms, optimization, water management, making decisions.*

INTRODUCCIÓN

La superficie regada en el mundo es elevada, encontrándose en constante aumento. En España, el país con mayor superficie de regadío de Europa, se sobrepasan las 3 500 000 ha (FAO⁶).

La gestión de los recursos hídricos en el regadío, el mayor consumidor de agua, es fundamental para su sostenibilidad. Para una correcta gestión debe disponerse de herramientas y sistemas de ayuda a la toma de decisiones, que permitan analizar las posibilidades de asignación y distribución de unos recursos escasos. Además, existe cada vez una mayor competencia entre los distintos usos (urbano, agrario, industrial, turístico, etc.) y el agua resulta a un precio más elevado (Directiva Marco 2000/60/CE).

Son múltiples los aspectos a considerar para hacer un buen uso del agua de riego, pero es fundamental encontrar la planificación productiva que maximiza el margen bruto atendiendo a las restricciones existentes. Este objetivo es complejo, ya que son muchos los aspectos que inciden sobre él (recursos disponibles, variabilidad climática, sistema de riego, costes de producción, subvenciones, etc.).

El modelo desarrollado permite analizar el entorno de decisión para definir el plan productivo a seguir de modo que sirva de ayuda en dicho proceso.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre los factores más importantes para conseguir un uso eficiente y racional del agua de riego están los siguientes^{11,14,10}:

- Planificación productiva del regadío para obtener la máxima rentabilidad económica del uso del agua, siendo el principal objetivo del modelo que se expone.
- Programación de riegos. El regante debe disponer de información sobre las necesidades de riego, de modo que la programación de riegos realizada se ajuste lo máximo posible a los requerimientos de sus cultivos, siguiendo los mejores criterios de eficiencia. Entre ellos deben considerarse los de eficiencia económica.
- Sistemas de distribución y aplicación de agua. Los sistemas de captación y distribución de agua son fundamentales para conseguir un uso eficiente de los recursos hídricos. Las redes de distribución y los sistemas de aplicación en parcela deben permitir disponer del agua en la parcela en el momento oportuno, según la programación de riegos y aplicarla al cultivo con la máxima eficiencia.
- Gestión, administración y otras consideraciones. Además de los aspectos enunciados anteriormente existe otra serie de condicionantes de gran relevancia. Entre ellos se encuentran los administrativos, legislativos, precio del agua, asesoramiento a los regantes, cultura de riego, etc., además del objetivo principal de este trabajo: la planificación productiva a seguir.

El MOdelo de OPTimización ECONómica del agua de riego (MOPECO), que se presenta en este artículo y del que se incluyen los resultados de su aplicación a una zona regable semiárida (Sistema Hidrogeológico 08.29, Albacete), es una útil herramienta en la ayuda

para la optimización productiva de una zona regable, atendiendo tanto a las especies a cultivar como al manejo del riego en las mismas.

EL MODELO DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES MOPECO

El modelo desarrollado se compone de tres módulos de cálculo¹⁰:

- *El primer módulo* proporciona las necesidades estacionales netas de riego para cada uno de los cultivos y para los diferentes años de la serie climática estudiada.

La información de partida necesaria para abordar cualquier supuesto de manejo del agua es la determinación de los consumos hídricos de los cultivos de interés y su respuesta en producción frente al riego. Esto obliga a recurrir a distintos métodos y técnicas de programación de riego⁵ y, coordinadamente, a funciones que relacionan la producción con el agua⁴ para conseguir un uso eficiente del recurso en un contexto de agricultura sostenible¹⁵. La programación de riegos, base para el cálculo de las necesidades estacionales netas, se realiza por medio del balance hídrico simplificado en el conjunto suelo-planta-atmósfera⁵, tal como se expone en la Figura 1.

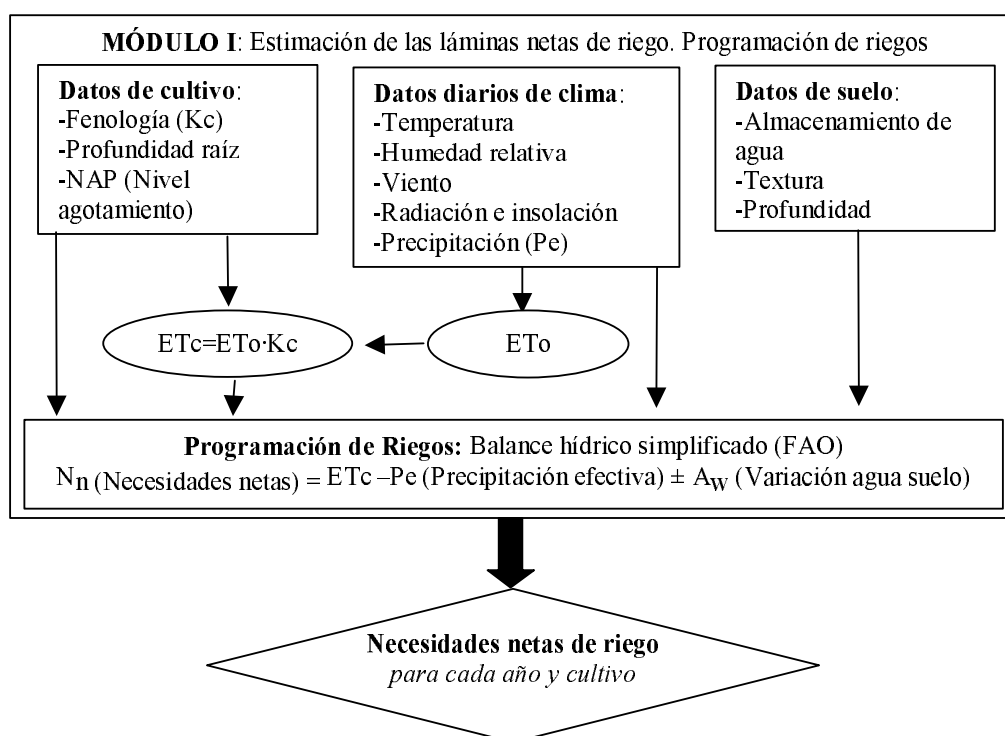


Figura 1. Diagrama de flujo del módulo I de MOPECO: necesidades netas de riego

- *El segundo módulo* incorpora la función normal de distribución del agua de riego, modelizándola a través del coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) e integrando la distribución de agua en la función de producción del cultivo. Así se obtiene el rendimiento alcanzado para cada cultivo y supuesto analizado.

La función normal reproduce adecuadamente el reparto de agua por el sistema de riego en la parcela tanto en sistemas de aspersión como en riego localizado^{2,15}.

En la función de producción de Stewart *et al.*¹³ se integra la función normal de distribución del agua por el sistema de riego. Empleando una distribución normal del agua de riego, la

función de producción del cultivo y utilizando los datos económicos necesarios (costes de producción respecto a la evapotranspiración relativa (ET_a/ET_m), coste del agua, precio de venta de los productos, ayudas y subvenciones, etc.), se determina la función de márgenes brutos para distintas láminas brutas de riego.

En la ecuación (1) se presenta el modelo multiplicativo integrando el efecto del riego sobre el rendimiento del cultivo (Figura 2).

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (1 - (k_{yi} \cdot (C_{dmi} \cdot (1 - p)_i))) \quad (1)$$

siendo Y el rendimiento real del cultivo (kg ha^{-1}), Y_m el rendimiento agrícola máximo de una zona (kg ha^{-1}), k_{yi} el factor de proporcionalidad, que indica la sensibilidad del cultivo al déficit hídrico⁴, C_{dmi} el coeficiente de déficit medio, definido como la relación entre la lámina de déficit y la requerida por el cultivo para máximo rendimiento, p la fracción de agua recibida de procedencia distinta al riego (lluvia efectiva, variación de la reserva del suelo) e i la etapa de crecimiento y desarrollo del cultivo.

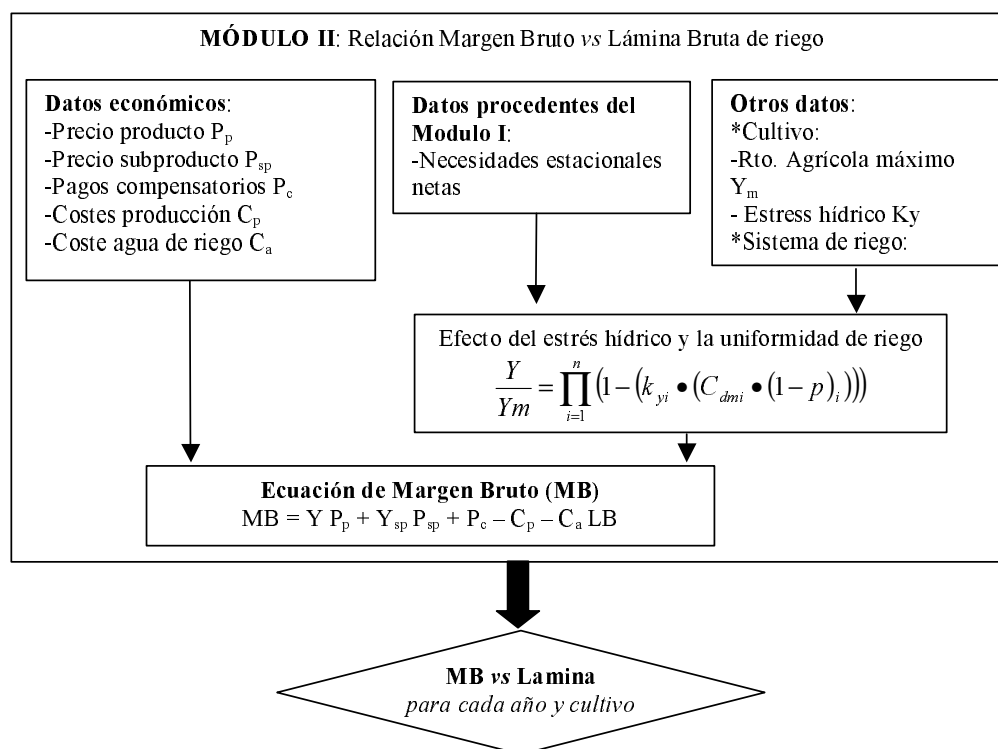


Figura 2. Diagrama de flujo del módulo II de MOPECO: margen bruto vs lámina bruta

Una vez conocido el rendimiento realmente alcanzado para las distintas láminas de riego simuladas a través de la función normal, se debe establecer el margen bruto correspondiente a cada caso. El margen bruto (MB) se ha calculado mediante la ecuación (2) (Figura 2).

$$MB = Y P_p + Y_{sp} P_{sp} + P_c - C_p - C_a LB \quad (2)$$

siendo MB el margen bruto (Euro ha^{-1}), Y el rendimiento agrícola real (kg ha^{-1}), P_p precio de venta del producto (Euro kg^{-1}), Y_{sp} el rendimiento del subproducto comercial (Euro kg^{-1}), P_{sp} el precio de venta del subproducto comercial (Euro kg^{-1}), P_c los pagos

procedentes de la ayuda compensatoria para algunos cultivos (Euro ha⁻¹), C_p los costes globales de producción (Euro ha⁻¹), C_a el coste de aplicación del agua de riego (Euro m⁻³) y LB la lámina bruta de riego descargada por el sistema (m³ ha⁻¹). Los costes globales de producción engloban todos los costes del proceso de producción agrícola (función de su itinerario técnico), excepto los costes fijos o de estructura de la explotación y los costes relativos a la aplicación del agua de riego, que son analizados a partir de la ecuación (2)^{1,10}.

Mediante la ecuación (2) se modeliza la relación existente entre el margen bruto y la lámina bruta de riego. En esta relación, no lineal (polinómica), participa el rendimiento producido, al depender de la lámina y de la uniformidad de riego.

- *El tercer módulo* de cálculo, partiendo de las funciones de márgenes brutos de los diferentes cultivos que se analizan y empleando técnicas de optimización con algoritmos genéticos, determina la alternativa, que, cumpliendo una serie de restricciones, permite el máximo margen bruto a la explotación en su conjunto¹⁰. Debido al interés de estas técnicas de optimización y de su aplicación a la resolución de problemas en ingeniería, se desarrolla en mayor medida este submodelo en el epígrafe posterior. Los tres módulos se han implementado en una aplicación informática para PC de fácil utilización para los usuarios finales, habiéndose programado los dos primeros módulos en Delphi (Turbo Pascal orientado a objetos) y el tercero en C++ Builder.

OPTIMIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

En nuestro caso buscamos obtener el máximo beneficio de la explotación como la suma de los beneficios de cada uno de los cultivos implicados. La expresión del beneficio total es

$$B_T = \sum_{i=1}^N B_i \quad (3)$$

en la que B_T es el beneficio total, B_i el beneficio del cultivo i y N el número de cultivos.

La expresión que permite obtener el beneficio del cultivo i viene dada por

$$B_i = T_i(1 - B_i)F\left(\frac{A_i}{T_i(1 - B_i)}\right) + B_b T_i B_i \quad (4)$$

siendo T_i la tierra dedicada al cultivo i (ha), B_i la porción en tanto por uno destinada a barbecho, $F()$ función que proporciona el beneficio bruto por ha a partir de lámina de riego (Figura 10), A_i la lámina asociada al cultivo (mm) y B_b beneficio del barbecho (Euro ha⁻¹ establecido por la PAC).

Aunque las técnicas clásicas de optimización son aplicables de una forma muy eficiente a infinidad de casos prácticos en el campo de la ingeniería, las características del nuestro, al tratarse de un problema no lineal con numerosas variables, el número de máximos locales es elevado, lo que complica enormemente la utilización de aquellas, resultando más adecuado el uso de técnicas basadas en la computación evolutiva.

Los algoritmos evolutivos (genéticos) guían la búsqueda estocástica de la solución mediante la evolución de un conjunto de estructuras (individuos) en las que, de un modo iterativo, se van seleccionando las que mejor se adaptan a la solución buscada⁷. Por analogía con la evolución natural se produce la supervivencia del más apto por su mejor adaptación al entorno, o dicho de otra forma: los más aptos tienen mayores posibilidades de sobrevivir y, por tanto, de transmitir sus características a las siguientes generaciones. Los individuos se caracterizan por un determinado genotipo, que representa la estructura de la información que lo caracteriza (la misma para toda la población). Al contenido de información de la estructura anterior (en general diferente para cada individuo) se denomina fenotipo.

Un algoritmo genético sigue básicamente el diagrama de flujo de la Figura 3.

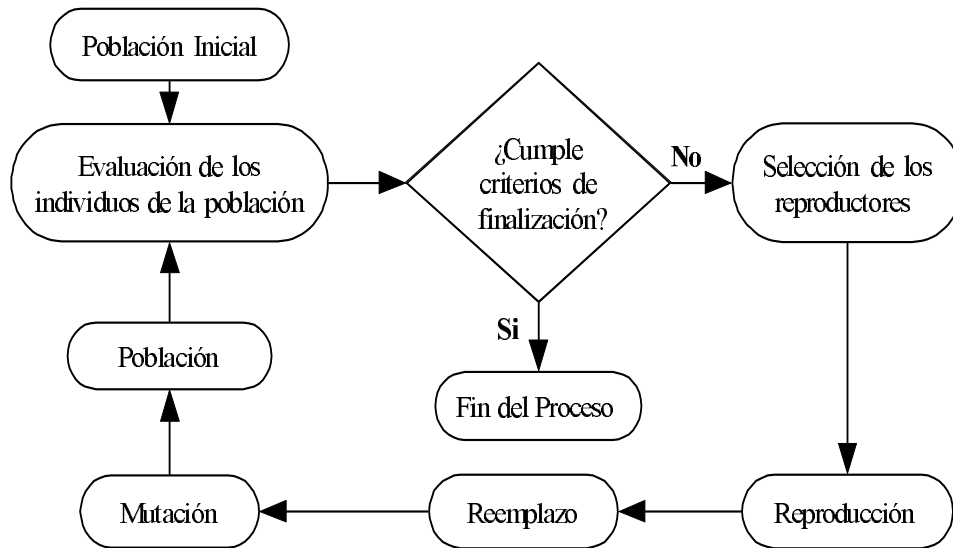


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo genético

El proceso comienza a partir de una población inicial (normalmente generada de forma aleatoria) en la que, una vez evaluados y clasificados los individuos por su “aptitud” (mejor adaptación a la solución buscada), se seleccionan aquellos que intervendrán en la reproducción para, tras realizar la misma, producir una nueva generación con nuevos elementos de la población (hijos), cuyos fenotipos se obtienen por combinación de los fenotipos de los individuos reproductores (padres). Con la finalidad de mantener una población constante en número a lo largo de todo el proceso, los nuevos individuos sustituirán, con ciertos criterios, a los menos aptos de la generación anterior, renovándose parte de la población en cada generación. Por último, antes de continuar con el proceso, se provocan mutaciones (cambio de algunos bits) en toda la población de forma aleatoria y con baja incidencia en el conjunto de los individuos. Todo el proceso continúa cíclicamente hasta que se llega a la generación máxima o a un valor de bloqueo previamente establecido¹².

Para nuestro caso, la implementación del algoritmo genético tiene en cuenta los elementos y la secuencia de procesos siguientes:

Codificación

Se establece la codificación mediante cadenas binarias del fenotipo de los individuos, de manera que cada combinación constituya una solución en el dominio del problema.

La adecuada codificación de la información es un factor clave en este tipo de planteamientos¹². En nuestro caso hemos establecido en tres el número de variables a tener en cuenta debido a la necesidad de encontrar para cada cultivo tanto la tierra ocupada como el agua aplicada y el porcentaje de la tierra anterior que se destinará a barbecho.

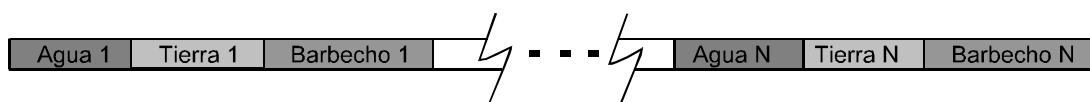


Figura 4. Estructura del código genético de la población

La estructura del código genético de la población (genotipo) queda tal y como se muestra en la Figura 4.

A cada valor de agua, tierra o barbecho correspondiente a un cultivo lo denominamos “gen”, por ello el código genético de los individuos estará formado por $3 \times (N + 1)$ genes, siendo N el número de cultivos considerados, al que hemos añadido un cultivo ficticio denominado “tierra libre”.

Para codificar cada gen se ha utilizado un valor entero de 32 bits (longitud del bus de datos de los procesadores actuales para PC). De esta forma se consigue a la vez alta velocidad de proceso y una buena precisión en los resultados.

Inicialización

Establecimiento de la población inicial o de partida del proceso. En nuestro caso se han utilizado poblaciones iniciales entre quinientos y mil individuos, cuyos genes se obtienen de forma aleatoria³. Aunque una parte de los individuos cambian en cada generación, mantenemos a lo largo de todo el proceso una población constante.

Función de evaluación y aptitud

Para la selección de los individuos es necesario establecer funciones que evalúen su nivel de aptitud. En efecto, para que el algoritmo cumpla su función, es necesario establecer un operador de evaluación adecuado al problema a analizar, que aporte el entorno donde evolucionan los individuos de la población. Este operador evalúa los códigos genéticos de todos los individuos de la población, asignando a cada uno de ellos un valor de “fitness” que nos permite seleccionar aquellos que mejor se adaptan a nuestro objetivo.

La forma de proceder es la siguiente: convertimos los valores binarios de cada gen a valores en coma flotante en el rango de 0 a 1 mediante la siguiente expresión

$$x = x_{\min} + gen \times \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^{Len} - 1} \quad (5)$$

siendo x el valor decodificado, x_{\min} , x_{\max} el mínimo y el máximo valor que puede adoptar x , respectivamente, gen el valor del gen y Len la longitud de bits del gen.

Para obtener el valor de la porción de tierra ocupada por cada cultivo usamos un sistema de puja, que funciona de la siguiente manera: sumamos todos los valores de la tierra correspondientes a los cultivos considerados, denominando “tierra límite total” al valor obtenido. Dividiendo el valor de la tierra de cada cultivo por la tierra límite total, obtenemos el tanto por uno de ocupación sobre el total. Con esta distribución toda la tierra estaría asignada a cultivos, no contemplando la posibilidad de tierra sin cultivar (barbecho o tierra de retirada). Para evitar esa situación, se introduce un cultivo “ficticio” que denominamos “tierra libre” y que, a todos los efectos, será considerado como un cultivo más, con sus características peculiares, tomando también parte en la puja. El sistema de puja tiene la ventaja de la gran variabilidad que produce en los resultados, ya que si un cultivo modifica su puja, producirá la variación todos los valores de tierra de los otros cultivos y consecuentemente del beneficio del individuo final. De esta forma se reduce la posibilidad de que la evolución de la población se estanque alrededor de un óptimo local. Con el agua asignada a cada cultivo se ha usado un procedimiento similar.

Para tener en cuenta las restricciones de cada cultivo en lo referente a la cantidad de tierra y agua asignada, se ha utilizado un procedimiento de penalizaciones⁹. Resultaría poco ventajoso eliminar a un individuo que obtiene un buen valor del beneficio, pero que no cumple, por muy poco, alguno de los límites establecidos para él, ya que, de esta forma, al dejar de formar parte del proceso de reproducción, no podría aportar su código genético a la evolución de la población. Esta penalización se consigue restando un múltiplo fijo del valor absoluto de la diferencia entre el valor que no cumple la restricción y la propia restricción.

Para el cálculo del barbecho partimos del valor de la tierra ocupada por el cultivo y lo multiplicamos por un valor en el margen $[0,1]$, obteniendo el tanto por uno de la tierra del cultivo que se destina a barbecho.

Para determinar el beneficio producido por un cultivo, obtenemos la tierra que ocupa, le quitamos el barbecho, calculamos el agua consumida por el cultivo y la dividimos por la tierra sin el barbecho para obtener la lámina aplicada. Con este último valor, consultando la tabla de beneficios por ha para este cultivo en función de la lámina de agua aplicada, obtendremos el beneficio total de la tierra cultivada. Posteriormente se calculan las posibles ayudas contempladas por la PAC (Política Agraria Comunitaria) para cada cultivo que se suma al anterior, obteniendo así el beneficio total.

A continuación se comprueban los límites de tierra, agua y barbecho del cultivo y se aplican las correspondientes penalizaciones. El beneficio total obtenido en la explotación es la suma del de todos los cultivos.

El módulo de evolución ordena a los individuos según el beneficio alcanzado por la solución que aportan, asignándoles una puntuación ("Score"), que se obtiene en función de la posición que ocupa cada individuo después de ordenar la población por el beneficio obtenido por cada individuo, a través de la ecuación

$$Score = \frac{N - X - 1}{100} \times P_s + 1 \quad (6)$$

siendo N el número de individuos, X la posición que ocupa el individuo entre 0 y $N-1$ y P_s la presión selectiva.

En la Figura 5 se muestra la asignación de las puntuaciones con presiones selectivas cero y cien, respectivamente.

El valor de presión selectiva cuantifica la ventaja que obtendrá un individuo que haya conseguido mejor beneficio a la hora de ser elegido para el operador reproducción. Si este parámetro es 0, todos los individuos tendrán la misma probabilidad de ser elegidos ($Score = 1$ para cada individuo). Con el valor de presión selectiva podemos disminuir el tiempo de búsqueda del valor óptimo, pero a costa de la pérdida de diversificación de genes en la población.

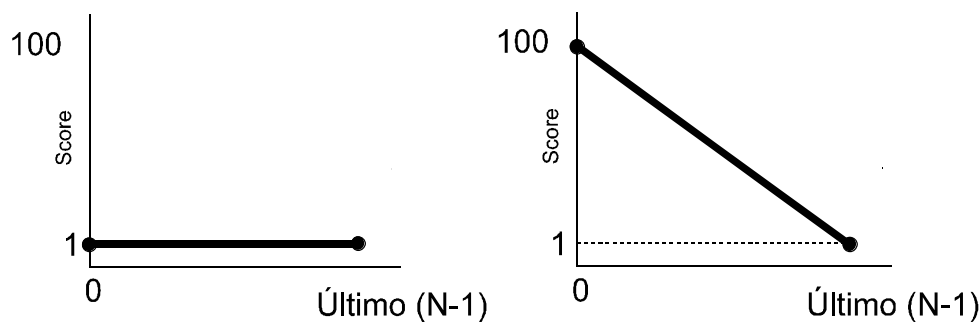


Figura 5. Asignación de puntuaciones con presión selectiva cero (izq.) y 100 (der.)

Durante el proceso de optimización comparamos, en cada generación, el beneficio producido por el individuo mejor adaptado de la población con el del individuo óptimo conseguido hasta el momento. Si los beneficios son iguales, significa que la población no ha evolucionado. Esta situación puede repetirse un número de veces determinadas, almacenando en el programa este valor que llamamos "bloqueo".

El valor de bloqueo se utiliza para detener el proceso de optimización cuando la población ya no puede evolucionar, bien porque hemos llegado al óptimo o porque se haya producido

un “bloqueo” alrededor de algún óptimo local. La detección de este último caso, nos permite aplicar a la población o a un individuo en concreto un determinado proceso que “saque” a la población del óptimo local y se pueda evolucionar para encontrar otra solución mejor. Esta situación se refleja en el detalle (A) de la Figura 8.

El proceso de desbloqueo que hemos utilizado consiste en la alteración del código genético del individuo óptimo conseguido hasta ese momento⁹. Para ello utilizamos una característica específica de nuestro problema consistente en la fuerte dependencia entre las variables de agua y tierra asignada de un cultivo con las de otro. En efecto, si consideramos dos cultivos (Cultivo-1 y Cultivo-2) con sus valores de agua y tierra asignados, es posible que el valor de agua-1 con tierra-1 proporcione un elevado beneficio, pero si parte de los recursos utilizados por el cultivo-1 los utilizamos en el cultivo-2, podrían aportar mayor beneficio incrementando las dos variables a la vez. Como en la evolución de los algoritmos genéticos lo más probable es que cambie sólo uno de los valores, si, por ejemplo la tierra-1 asignada disminuye, puede ocurrir que este cultivo tenga más agua de la que necesita, en cambio, el cultivo-2 con mayor cantidad de tierra asignada no tenga el agua suficiente. En este caso el beneficio disminuiría resultando esta solución intermedia peor que la de partida.

Para evitar la situación planteada en el párrafo anterior, necesitamos que el algoritmo modifique las variables dos a dos para que pueda alcanzar mejores soluciones. Para ello, partiendo de un cultivo de referencia, modificamos las variables de tierra y agua a la vez para dos cultivos, cambiando 4 bits del código genético del mejor individuo a la vez (cada bit pertenece a cada uno de los valores mencionados). Después se evalúa la nueva solución y si es mejor que la de partida se inserta en la población.

Operadores genéticos

Se utilizan en el proceso de reproducción tanto para el cruce como para la mutación⁷ de los fenotipos de los individuos. Como codificamos con cadenas binarias, los operadores utilizados son lógicos: AND, OR y OR-EXCLUSIVA.

Selección de los criadores

Tras la asignación de la puntuación a cada individuo se procede a la selección de los que participaran en la reproducción. Se busca que los individuos con puntuación más alta tengan mayor probabilidad de reproducirse, pero que, en cualquier caso, todos los individuos puedan ser elegidos.

El método utilizado para la elección de los individuos es el siguiente: se calcula una puntuación acumulada asignando al primer individuo su puntuación, al siguiente se le asigna un valor que es suma de la puntuación acumulada del individuo anterior más su propia puntuación y así sucesivamente, tal y como se muestra en el ejemplo de la Tabla I, donde se ha elegido una presión selectiva de 100.

	Beneficio	Orden	Puntuación	Acumulada	Acum./Total
Individuo 1	2500	2	2	2	0,2
Individuo 2	3500	0	4	6	0,6
Individuo 3	2000	3	1	7	0,7
Individuo 4	3000	1	3	10	1

Tabla I. Asignación de puntuación acumulada

El valor de la puntuación acumulada del último individuo, que denominamos “total”, nos permite una normalización de los valores acumulados que se obtienen dividiendo la

puntuación acumulada de cada individuo entre dicha cantidad. De esta forma, el último valor de esta columna “normalizada” será 1 y el valor de todos los individuos anteriores estará comprendido entre 0 y 1.

Para la elección de los (N - número par) individuos que participarán en la reproducción, se establece (para cada uno de ellos) el siguiente proceso: se calcula un valor aleatorio entre 0 y 1 y se explora toda la población hasta que se encuentra un valor de puntuación acumulada superior a dicho valor aleatorio, tal y como se indica en la Figura 6.

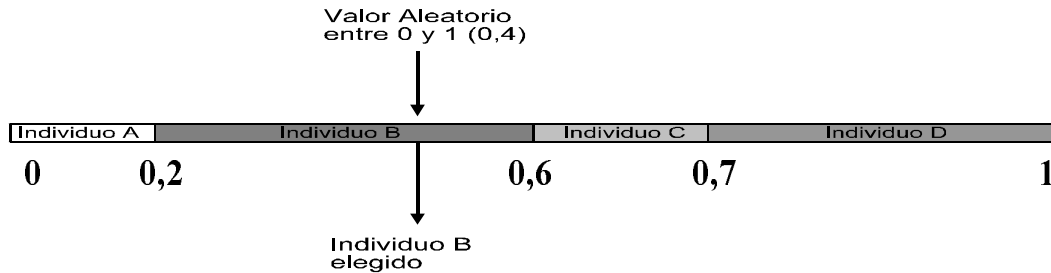


Figura 6. Elección de un individuo para la reproducción en una población de cuatro

Una vez establecidas aleatoriamente las parejas, se procede a su reproducción, en nuestro caso hemos establecido que cada pareja tenga dos hijos. Obtenemos un número entero aleatorio entre 0 y el número menos uno de bits de los genes. Este valor se usa para dividir las cadenas correspondientes a los hijos en dos partes, de las cuales en la cadena para el primer hijo una será ocupada por los bits del gen del padre de la misma posición y el resto por bits del gen de la madre y en la cadena del segundo hijo de modo complementario, tal y como se indica en la Figura 7. De esta manera cruzamos el código genético de los individuos un número de veces igual al número de genes que tenga la población.

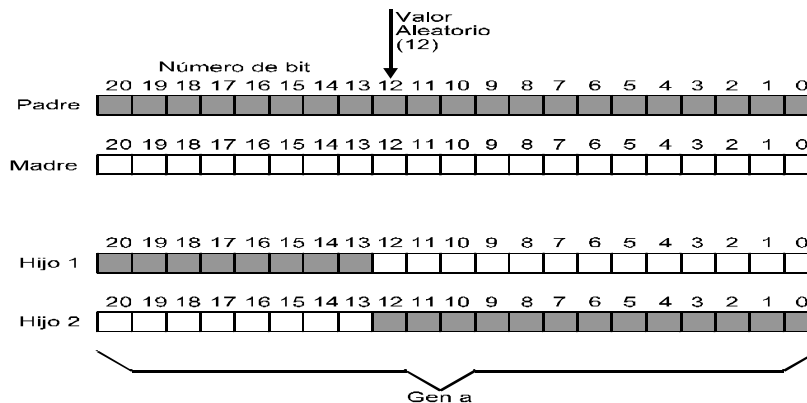


Figura 7. Cruce de individuos gen a gen

El porcentaje de individuos que participan en la reproducción es configurable. Para la implementación de nuestro caso se ha elegido la cifra del 30 %, es decir, 150 individuos (75 parejas).

Selección de la población

Tras cada reproducción es necesario establecer los criterios para obtener la “nueva” población y poder continuar así con el proceso.

La descendencia obtenida formará parte de una población intermedia que sustituirá a los individuos con menor puntuación, además de insertar de nuevo en la población al individuo óptimo, que es el individuo con mejor adaptación al medio y que no tiene por que coincidir con el individuo mejor adaptado en la generación actual. De esta manera, introducimos el código genético con la mejor solución que conocemos, favoreciendo así que se vuelva a cruzar con otros individuos para conseguir soluciones mejores, reduciendo el tiempo de búsqueda de la solución óptima a costa de sacrificar diversidad en la exploración de soluciones.

Mutación de los individuos

Para aumentar la diversidad se utilizan operadores de alteración o mutación que, actuando sobre los individuos seleccionados, realizan pequeñas modificaciones en alguno de sus genes. Al tratarse de información binaria, la mutación consiste en cambiar en sus fenotipos ceros por unos y unos por ceros.

Aplicamos un operador de mutación bit a bit a toda la población con el siguiente procedimiento: obtenemos para cada bit un número aleatorio, si este número es menor que la probabilidad de que mute un bit (parámetro de la simulación), ésta se producirá y, en caso contrario permanecerá igual. Para que dicha probabilidad sea independiente del número de bits de la población, se considera la de que mute un individuo y se transforma para que sea la correspondiente a un bit. Para obtener la máxima eficiencia en el proceso de mutación se han utilizado “máscaras”, dependiendo del gen considerado en cada caso, para proteger los bits que se mantienen y facilitar así la aplicación de operadores lógicos para los cambios.

Parámetros de funcionamiento

Necesarios para la implementación del algoritmo (tamaño de la población, precisión en la codificación, porcentaje de mutaciones, porcentaje de reproducciones, penalización, presión selectiva, etc.) dándole a éste la máxima versatilidad cuando son configurables, como es nuestro caso.

Restricciones

Las características del problema imponen restricciones o limitaciones a las posibles soluciones. Se trata de fenotipos no factibles que hay que detectar y penalizar en el proceso.

Las restricciones principales en nuestra aplicación son los límites de tierra y agua asignados en cada cultivo. También es una restricción fundamental las directrices de la PAC en cuanto a los porcentajes de tierra que deben o pueden dejarse sin cultivar.

Finalización

Establecimiento de las condiciones que deben darse para considerar que la solución alcanzada es aceptable (que la población no evolucione, rebasado el bloqueo máximo) o, por el contrario, para abortar el proceso de búsqueda, ya que no converge a una solución válida (por haber excedido el número de generaciones máximas). El proceso de optimización con 16 cultivos, 1000 individuos y una precisión hasta el 3er decimal se realiza en menos de una hora utilizando un ordenador con procesador Pentium IV a 2 GHz, 512 MB de RAM y Windows 2000.

En la Figura 8 se representa mediante dos curvas la evolución de la población a lo largo de las generaciones. En una de ellas se muestra la aptitud del individuo mejor adaptado y en la otra la aptitud media de la población. Como puede observarse, ambas curvas siguen la evolución “típica” de los algoritmos genéticos, donde la aptitud del individuo mejor adaptado evoluciona hacia la solución óptima de la misma forma que la aptitud media de la población.

En la Figura 8 se resalta (detalle A) el efecto que la función de desbloqueo tiene sobre la evolución de la población. Esta función que se aplica en la generación 515, al detectar un “bloqueo”, tiene como consecuencia un nuevo impulso en la evolución de la población.

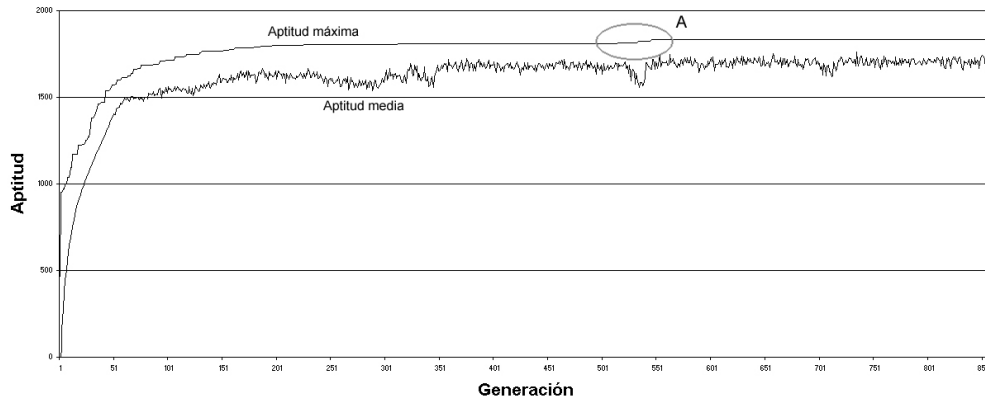


Figura 8. Evolución de la aptitud de la población en las diferentes generaciones

EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se indica el planteamiento y los resultados obtenidos en un ejemplo de aplicación del modelo.

El modelo MOPECO se aplica en Castilla La Mancha, concretamente el escenario es el Sistema Hidrogeológico 08.29 de la Mancha Oriental, que abarca unos 8 500 km² (Figura 9). El sistema acuífero soporta unas 100 000 ha de riego (empleando recursos subterráneos), además de abastecer las necesidades de una población próxima a 300 000 habitantes⁸.

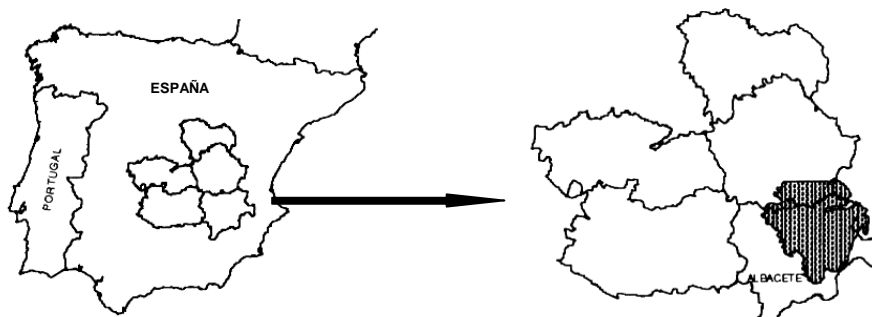


Figura 9. Localización del escenario de aplicación de MOPECO

Los regantes se encuentran agrupados en la Junta Central de Regantes del Mancha Oriental (JCRMO), cuyo objetivo es ordenar el uso del agua, asignando unos recursos medios de 6 000 m³ ha⁻¹ año⁻¹ o 4 000 m³ ha⁻¹ año⁻¹, dependiendo de la situación legal de los aprovechamientos⁸. El escenario en el que se ha trabajado ha sido el de menor disponibilidad de agua (4 000 m³ ha⁻¹ año⁻¹), en el que el modelo puede ser de mayor ayuda.

Para la aplicación de MOPECO se ha empleado la serie climática de 1974 a 2000 del Observatorio Meteorológico de Los Llanos (longitud 1° 51 W, latitud 38° 57 N; altitud 704 m).

En cuanto a las características de las explotaciones, las más frecuentes tienen una superficie media de 50 ha, representando el 68 % de las explotaciones existentes sobre este territorio, aplicando el modelo en este supuesto.

Los cultivos seleccionados como posibles integrantes de las alternativas se han establecido considerando: a) superficie actualmente ocupada, b) importancia económica y social y c) perspectivas de futuro de algunos cultivos (p.e., hortícolas). Se ha trabajado con 16 cultivos, de los que en el proceso de optimización se han seleccionado los 6 siguientes: ajo, alfalfa, cebada, cebolla, patata de ciclo tardío y remolacha azucarera. En la Tabla II se muestran los resultados relativos a las necesidades de riego de los mismos.

El sistema de riego más frecuente en la zona es la aspersión, en más del 75 % de la superficie regada. El sistema de riego con el que se plantea este trabajo, mayoritario en las explotaciones agrícolas de tamaño medio, es la cobertura total enterrada, con unos valores medios de CU del 82 %¹⁶.

El coste medio de aplicación del agua de riego con los sistemas descritos¹⁰ es de 0,09 Euro m⁻³, incluyendo los principales costes imputables a la aplicación del agua de riego (extracción, almacenamiento, bombeo, etc.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Módulo I: Necesidades estacionales de riego

En la Tabla II se presentan los resultados correspondientes a las necesidades estacionales netas de los cultivos seleccionados para el supuesto de máximo rendimiento.

La remolacha azucarera es el cultivo que registra unas necesidades de agua de riego superiores, unidas al menor coeficiente de variación (CV). Contrariamente, la cebada o el ajo han completado sus ciclos al inicio del verano, y tienen unas necesidades reducidas, entorno a 350–400 mm y con un CV elevado (superior al 20 %). Este hecho se debe a la importancia que la precipitación puede representar alguno de los años para cubrir parte de sus necesidades y a la propia variabilidad que caracteriza la precipitación en la zona.

Cultivo	Lámina neta media (mm)	Lámina neta máxima (mm)	Lámina neta mínima (mm)	SD	CV (%)
Ajo	380,52	528,45	272,34	79,33	22,25
Alfalfa	624,91	757,67	500,45	69,48	11,98
Cebada	340,64	483,41	189,05	76,01	24,04
Cebolla	555,29	678,48	460,44	59,43	12,33
Patata tardía	488,55	614,70	376,03	59,76	12,97
Remolacha	700,11	825,53	573,89	71,40	10,20

Tabla II. Necesidades estacionales netas. Medidas de posición y dispersión

Módulo II: Margen bruto versus lámina bruta

Lámina bruta óptima. El efecto de la uniformidad de aplicación del agua de riego varía con el cultivo (costes de producción, precio de venta, rendimiento, respuesta al riego, etc.).

A modo de ejemplo se incluye la relación existente entre el margen bruto y la lámina de riego para el cultivo de la remolacha azucarera, observándose un rápido crecimiento hasta valores máximos elevados, 850 mm el año medio, desde el que se produce un descenso progresivo (Figura 10).

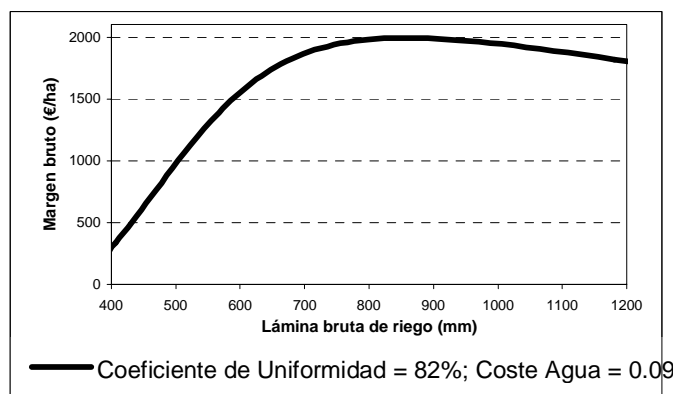


Figura 10. Relación entre el margen bruto y la lámina de riego en el cultivo de la remolacha (año medio)

Las láminas brutas óptimas en la remolacha azucarera están comprendidas entre láminas mínimas de 780 mm y máximas de 1.175 mm (Figura 11). Las láminas óptimas son siempre inferiores a las necesarias para el máximo rendimiento, presentándose valores de relación de evapotranspiración (ET_a/ET_m) comprendidos entre el 90 y el 98 %.

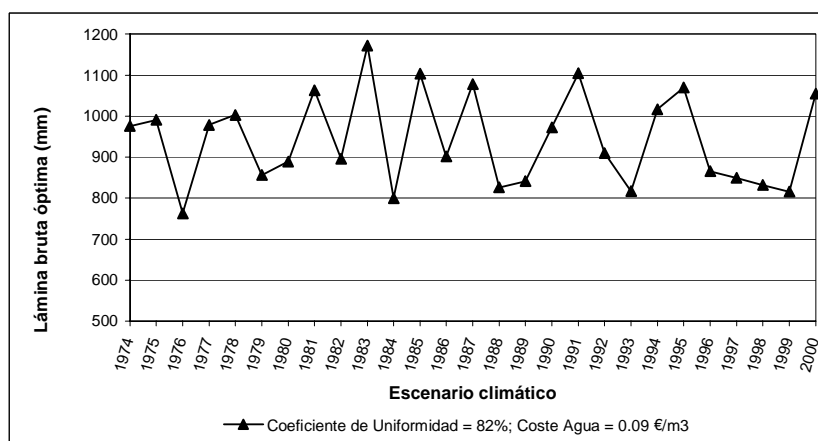


Figura 11. Evolución interanual de la lámina de riego bruta óptima para el cultivo de la remolacha azucarera

Módulo III: Alternativas de cultivo óptimas

En la Tabla III se presenta la alternativa de cultivos que maximiza el margen bruto de la explotación analizada con unos recursos hídricos disponibles de $4.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, teniendo gran trascendencia (social, económica, ambiental, etc.) el uso del agua. Los resultados mostrados se corresponden con el año climáticamente medio y suponen un margen bruto medio en la explotación elevado ($1.835 \text{ Euro ha}^{-1}$), por encima del que la media de las explotaciones de la zona están alcanzando ($1.200\text{--}1\ 750 \text{ Euro ha}^{-1}$).

Cultivo	Participación (%)	Lámina bruta ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)
Alfalfa	10,0	7653
Ajo	15,0	4750
Cebada	36,4	0
Cebolla	10,0	7020
Patata tardía	15,0	6232
Remolacha	10,0	8854
Tierra de retirada	3,6	0
Marg en bruto medio: 1835,15 Euro ha^{-1}		

Tabla III. Alternativa de cultivos y manejo del riego óptimo para el año medio en una explotación con unos recursos medios disponibles de $4\,000 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$

La alternativa obtenida para el año medio la consigue el programa de optimización buscando la combinación de cultivos y la distribución del agua de riego de acuerdo con las características y restricciones de la zona, de modo que se maximice el margen bruto de la explotación. Los cultivos de máximo margen bruto (p.ej., cebolla, ajo, remolacha azucarera) completan la máxima superficie a que se restringen, aplicando sobre ellos láminas elevadas, próximas a las de máximo margen bruto e inferiores a las necesarias para máximo rendimiento. Otros cultivos, con una rentabilidad intermedia (p.ej., alfalfa, patata), entran a formar parte de la alternativa en función del agua que queda disponible, no ocupando, normalmente, la máxima superficie posible. Finalmente, una vez asignada el agua disponible a los cultivos que maximizan el beneficio, la solución ofrecida completa la superficie de la explotación con cultivos de secano, cebada en este caso (36,4 %), con su correspondiente tierra de retirada (3,6 %) en función de las exigencias de la PAC.

Otros cultivos posibles de elevadas necesidades y/o, en general, reducida rentabilidad económica no entran a formar parte de la solución (p.ej., el maíz).

CONCLUSIONES

El modelo es una herramienta útil para la planificación productiva de las explotaciones, permitiendo optimizar económicamente el uso del agua de riego.

Las láminas de riego óptimas (máximo margen bruto) de cada cultivo son siempre inferiores a las necesarias para el máximo rendimiento, debiéndose incluir este criterio en la programación de riegos.

El modelo de optimización basado en algoritmos genéticos da resultados adecuados, resolviendo un problema de optimización no lineal complejo, en el que, además el número de variables que intervienen es elevado. Se ha desarrollado un sistema de procesado efectivo del mejor individuo para evitar el estancamiento de la población.

Los tiempos de procesado son relativamente elevados, especialmente cuando el número de cultivos es alto. En este aspecto debe seguirse trabajando tanto desde el punto de vista de su programación como en la búsqueda de nuevos procedimientos operativos.

REFERENCIAS

- 1 R. Alonso y A. Serrano, “*Los costes en los procesos de producción agraria. Metodología y aplicaciones*”, Mundi-Prensa, Madrid, España, (1991).
- 2 H. Anyoji e I.O. Wu, “Normal distribution water application for drip irrigation schedules”, *Trans. ASAE*, **37**, pp. 159–164, (1994).
- 3 L. Davis, “*Handbook of genetic algorithms*”, Van Nostrand Reinhold, New York, (1991).
- 4 J. Doorenbos y A.H. Kassam, “Yield response to water”, *Irrig. and Drain*, **33**, FAO, Roma, Italia, (1979).
- 5 J. Doorenbos y W.O. Pruitt, “Crop water requirements”, *Irrig. and Drain*, **24**, 4ª edición, FAO, Roma, Italia, (1992).
- 6 FAO (Food and Agriculture Organization), “FAOSTAT, statistic database”, Servidor Web de la FAO <http://apps.fao.org>, consultado en diciembre de 2001, (2001).
- 7 D.E. Goldberg, “*Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*”, Addison-Wesley Co. Inc., Reading, MA., (1989).
- 8 F.J. Martín de Santa Olalla, A. Brasa, C. Fabeiro, D. Fernández y H. López, “Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha”, *Spain Agricultural Water Management*, **40**, pp. 195–205, (1999).
- 9 Z. Michalewicz, “*Genetic algorithms + data structures = evolution programs*”, Springer-Verlag, (1994).
- 10 J.F. Ortega, “*Desarrollo de una metodología para la ayuda a la toma de decisiones en el marco de una agricultura de regadío sostenible. Aplicación del modelo en el sistema hidrogeológico 08.29*”, ETS Ingenieros Agrónomos y Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España, (2000).
- 11 J.F. Ortega, J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan, H. López y D. Fernández, “Servicio de asesoramiento de riegos de Albacete”, *ITEA*, **93**, pp. 183–202, (1997).
- 12 A. Pérez-Serrada, “Una introducción a la computación evolutiva”, Proyecto fin de carrera, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, (1996).
- 13 J.I. Stewart, R.M. Hagan, W.O. Pruitt, R.J. Kanks, J.P. Riley, R.E. Danilson, W.T. Franklin y E.B. Jackson, “*Optimizing crop production through control of water and salinity levels*”, Utah Water Res. Lab. PWRG 151-1, Utah, EE.UU., (1977).
- 14 J.M. Tarjuelo, “El riego por aspersión y su tecnología”, 2ª edición, Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España, (1999).
- 15 J.M. Tarjuelo y J.A. de Juan, “Crop water management”, In: N.H. van Lier, L.S. Pereira y F.R. Steiner, “*CIGR Handbook of agricultural engineering*” Volumen I: “*Land and water engineering*”, ASAE y CIGR, St. Joseph, MI, EE.UU., (1999).
- 16 J.M. Tarjuelo, J. Montero, P.A. Carrión, F.T. Honrubia y M.A. Calvo, “Irrigation uniformity with medium size sprinklers”, Parte II: “Influence of wind and other factors on water distribution”, *Trans. ASAE*, **42**, pp. 677–689, (1999).