

A-04-2023

Comunicación científico-técnica

Evaluación de Métodos de Optimización Matemáticos y Algoritmos Genéticos para la Mejora del Manejo del Fertirriego con una Mezcla de Aguas Desaladas y Convencionales

Performance Evaluation of Mathematical Programming Methods and Evolutionary Algorithms for the Optimization of the Fertigation management with a Blend of Desalinated Seawater and Conventional Water

Autores: Reca, J.; Martínez, J. Marín-Membrive, P., Lao, M.T., Valera, D.

1 Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL). Universidad de Almería.

Resumen:

El uso de agua de mar desalada (AMD) para el riego de los cultivos es una solución cada vez más habitual en zonas regables del litoral mediterráneo debido a la gran escasez de recursos hídricos en esta zona.

El agua de mar desalada (AMD) es una fuente inagotable de agua de alta calidad, cuyo uso puede permitir no solamente aumentar la producción y la calidad de los cultivos, sino también contribuir a la recuperación de los acuíferos sobreexplotados debido a la reducción de las extracciones y a la disminución y la mejora de calidad de los retornos de riego. No obstante, a pesar de sus grandes ventajas, el AMD también presenta algunos inconvenientes. Entre ellos, cabe mencionar un coste más elevado del agua y la mayor aplicación de fertilizantes ya que deben ser aportados todos los nutrientes que requiere la planta.

El uso conjunto de agua desalada y agua convencional en la proporción adecuada se ha propuesto como una solución ideal para reducir el coste del agua y las necesidades de nutrientes. Para ello, se están desarrollando modelos de optimización de la combinación agua



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



de diferente calidad y de optimización de la fertirrigación del cultivo específicamente diseñados para la gestión conjunta de AMD y subterráneas.

En este trabajo, se pretende evaluar diferentes métodos de optimización no lineal y algoritmos genéticos para mejorar la robustez y velocidad de convergencia de los modelos de optimización del fertirriego de cultivos de invernadero con una mezcla de AMD y de agua convencional. El modelo se ha desarrollado en el entorno de una hoja de cálculo Microsoft Excel©, utilizando el lenguaje de programación VBA© y el módulo de optimización de Excel denominado Solver©, que dispone de un algoritmo de programación no lineal denominado GRG2, basado en el método del gradiente y de un algoritmo evolutivo.

El modelo se ha aplicado a un caso práctico real de una explotación de cultivo intensivo bajo invernadero situada en el término municipal de Níjar que utiliza agua de mar desalada de la Planta Desaladora de Carboneras y agua subterránea procedente de un pozo denominado "El Jabonero". Los resultados confirman que los métodos de optimización empleados han logrado encontrar la solución que optimiza la fertirrigación del sistema de forma precisa y robusta. No obstante, el método de programación no lineal GRG2 ha encontrado la solución rápidamente y con menor esfuerzo computacional que el algoritmo genético.

El modelo permite establecer las estrategias óptimas de fertirrigación para cada porcentaje de mezcla de aguas y estimar el coste total y la conductividad eléctrica (C.E.) de la solución nutritiva y de los diferentes componentes de ésta (agua desalada, de pozo y fertilizantes), lo que resulta imprescindible para adoptar decisiones racionales de manejo del fertirriego en estas condiciones.

Palabras clave: Fertirriego, Agua de mar desalada (AMD), optimización, invernadero

Abstract:

The use of desalinated seawater (DSW) to irrigate crops is an increasingly common solution in irrigable areas of the Mediterranean coast due to the scarcity of water resources in that area.

The use of desalinated water is an unlimited source of high-quality water. Its use can not only increase the production and quality of crops, but also contribute to the recovery of overexploited aquifers due to the reduction of water withdrawals and to the diminution and increase in quality of the of the irrigation returns. However, despite its great advantages, it has some drawbacks. Among them, it is worth mentioning its higher cost and the greater need for fertigation since all the nutrients that the plant requires must be artificially supplied.

The conjunctive use of desalinated water and conventional water in the appropriate proportion has been proposed as an ideal solution to reduce the cost of water and fertigation needs. To this end, models are being developed to optimize the combination of water of different quality and to optimize crop fertigation specifically designed for the management of mixtures of AMD and groundwater.

This work aims to evaluate different nonlinear optimization methods and genetic algorithms to improve the robustness and efficiency of the optimization models for fertirrigation of greenhouse crops with a mixture of AMD and conventional water. The model has been developed in the Microsoft Excel[®] spreadsheet environment, using the VBA[®] programming language and the Excel optimization module called Solver[®], which has a non-linear programming algorithm called GRG2, based on the gradient method, and an evolutionary algorithm.

The model has been applied to a real case of an intensive greenhouse farm located in the municipality of Níjar that uses desalinated seawater from the Carboneras Desalination Plant and groundwater from a well called "El Jabonero". The results confirm that both optimization methods have managed to find the solution that optimizes the fertigation of the system in a precise and robust way. However, the GRG2 nonlinear programming method has found the solution more quickly and with less computational effort than the genetic algorithm.

The model allows establishing the optimal fertigation strategies for each percentage of water mixture and estimating the total cost and electrical conductivity of the nutrient solution and its different components (DSW, groundwater and fertilizers). This information is essential to adopt rational fertigation management decisions under these conditions.

Keywords: Fertigation, Desalinated Seawater (DSW), optimization, greenhouse

1. Introducción

El uso de agua de mar desalada (AMD) para el riego de los cultivos es una solución cada vez más habitual en zonas regables del litoral mediterráneo debido a la escasez de recursos hídricos en el área [1]. El agua desalada es una fuente inagotable de agua de alta calidad, cuyo uso puede permitir no solamente aumentar la producción y calidad de los cultivos, sino también contribuir a la recuperación de los acuíferos sobreexplotados debido a la reducción de las extracciones de agua y a la disminución y mejora de la calidad de los retornos de riego [2]. No obstante, a pesar de sus grandes ventajas, ésta también presenta algunos inconvenientes. Entre ellos, cabe mencionar un coste más elevado y la mayor necesidad de aportación de nutrientes.

El uso conjunto de agua desalada y agua convencional en la proporción adecuada se ha propuesto como una solución ideal para reducir el coste del agua y las necesidades de aportación de nutrientes. Para ello, se están desarrollando modelos de la fertirrigación de los cultivos específicamente diseñados para la gestión conjunta de AMD y aguas subterráneas. Entre estos modelos cabe citar el modelo GARUM [3], que permite optimizar la mezcla de AMD y de agua de pozo para maximizar el beneficio económico del agricultor considerando variables que condicionan la productividad del cultivos como la calidad del agua convencional, el tipo de cultivo, el tipo y la uniformidad del sistema de riego y los precios del agua desalada y del agua convencional. El modelo GARUM consideraba solamente el efecto de la mezcla de agua, pero no tiene en cuenta el efecto de las necesidades y coste de los fertilizantes. Por este motivo, posteriormente, se desarrolla el modelo IRRIBLEND-DSW [4], el cual incorpora la gestión de la fertirrigación y está especialmente diseñado para el manejo óptimo de cultivos en sustrato con mezclas de agua desalada y convencional.

Los utilización de métodos de optimización matemáticos y heurísticos en diversos campos de la ingeniería, y particularmente, en la ingeniería hidráulica y del riego se ha generalizado en las últimas décadas [5]–[9]. Las ventajas de estos métodos es que permiten encontrar soluciones óptimas a diversos problemas con tiempos de cálculo razonables. Como consecuencia, el uso de dichos métodos para resolver el manejo óptimo de la fertirrigación con mezclas de aguas desaladas y convencionales puede proporcionar soluciones óptimas mejorando la precisión y eficacia de los modelos propuestos.

En este trabajo se va a explorar la viabilidad del uso de diferentes técnicas de optimización para establecer programas óptimos de manejo de fertirrigación con mezclas de aguas desaladas y convencionales. En particular, se van a contrastar y evaluar el rendimiento de un método de optimización matemática no lineal y un algoritmos genético o evolutivo. Para ello se va a desarrollar un modelo de ordenador que va a proporcionar para cada fracción de mezcla de aguas, la estrategia de optimización de la solución nutritiva, así como su coste y su conductividad eléctrica.

2. Materiales y métodos

2.1. Fundamentos teóricos del modelo.

Fertirrigación es la aplicación conjunta de agua y fertilizantes [10]. El problema que se plantea es determinar la cantidad de fertilizantes que es necesario añadir al agua de riego para obtener una solución nutritiva (SN) que proporcione el mejor equilibrio entre los diferentes nutrientes para la planta. A dicha solución perfectamente balanceada se la conoce como solución nutritiva objetivo o ideal (SN_o). Este problema se puede formular como un problema de optimización. De esta forma, optimizar la fertirrigación significa encontrar la mejor combinación de abonos o fertilizantes a añadir al agua de riego de forma que se consiga el mejor ajuste entre la composición de la solución nutritiva (SN) y dicha solución ideal (SN_o).

Para conseguir dicho ajuste, se plantea como función objetivo minimizar la suma de las desviaciones cuadráticas entre la composición de nutrientes (iones) en la solución nutritiva respecto a la solución ideal. Los aniones que contribuyen más significativamente a la nutrición de la planta son los siguientes: NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻, mientras que los cationes son NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺. Éstos deben estar presentes en el agua de riego o ser añadidos mediante el aporte de las cantidades apropiadas de fertilizantes. El problema se complica cuando usamos conjuntamente una combinación de agua desalada y agua convencional en unas determinadas proporciones. La complejidad del problema recomienda el uso de modelos de optimización específicos que faciliten dicho ajuste óptimo de la solución.

Si definimos $Cme(i, j)$ como la matriz que contiene la concentración (en meq L⁻¹) de los N_j iones aportados a la solución nutritiva por cada uno de los N_i fertilizantes, dicho vector puede calcularse según la siguiente expresión:

$$Cme(i, j) = Nme(i, j) \cdot Cmm^T(i) \quad (1)$$

Donde; $Nme(i, j)$ = es una matriz que contiene el número de me mmol⁻¹ de cada uno de los iones j del fertilizante i . El elemento $Nme(i, j)$ de dicha matriz tomará el valor 0 si el fertilizante i no contiene el ion j o un número entero que depende de la valencia del ion en caso contrario. Cmm^T es un vector columna que representa la concentración en mmol L⁻¹ que se aporta a la solución nutritiva del fertilizante i .

El vector fila $Cme_F(j)$, que contiene la concentración en meq L⁻¹ del ion j aportada por el conjunto de fertilizantes, se calcula mediante la suma de los iones j aportados por el conjunto de fertilizantes añadidos a la solución nutritiva (SN), mediante la siguiente ecuación:

$$\overrightarrow{Cme_F(j)} = \sum_{i=1}^{N_i} Cme(i, j) \quad (2)$$

A la concentración de iones aportada por los fertilizantes hay que añadir los iones aportados por el agua de riego que, a su vez, depende de la composición química de las aguas a utilizar y de la proporción de agua utilizada en la mezcla. Si consideramos sólo 2 tipos de aguas,

desalada y convencional, y denotamos como (α) la fracción de agua desalada utilizada en la mezcla, la concentración de iones aportada por el agua de riego se puede calcular de la siguiente forma:

$$\overrightarrow{Cme}_{AR}(j) = \alpha \cdot \overrightarrow{Cme}_{AD}(j) + (1 - \alpha) \cdot \overrightarrow{Cme}_{AC}(j) \quad (3)$$

Donde: $\overrightarrow{Cme}_{AR}(j)$ es el vector que contiene la concentración de cada uno de los iones j (en meq L⁻¹) aportados por la mezcla de aguas, mientras que $\overrightarrow{Cme}_{AD}(j)$ y $\overrightarrow{Cme}_{AC}(j)$, los aportados por el agua desalada y convencional, respectivamente. Esta expresión podría generalizarse si se utilizan un mayor número de aguas en la mezcla.

Finalmente, a partir de las ecuaciones 1 a 3, la concentración de iones j (en meq L⁻¹) presentes en la solución nutritiva, $\overrightarrow{Cme}_{SN}(j)$, viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Cme}_{SN}(j) &= \overrightarrow{Cme}_F(j) + \overrightarrow{Cme}_{AR}(j) \\ &= \sum_{i=1}^{N_i} Nme(i, j) \cdot \overrightarrow{Cmm}^T(i) + \alpha \cdot \overrightarrow{Cme}_{AD}(j) + (1 - \alpha) \cdot \overrightarrow{Cme}_{AC}(j) \end{aligned} \quad (4)$$

En la ecuación 4, la concentración de iones en la solución nutritiva depende de $\overrightarrow{Cmm}^T(i)$ que es un vector columna que contiene la concentración de fertilizantes i aportada a la solución y de la proporción de mezcla (α), que son las variables independientes del problema a optimizar.

2.1.1 Función objetivo.

Para cada posible valor de α , las cantidades de fertilizantes aportadas que optimizan el ajuste a la solución nutritiva objetivo se pueden obtener minimizando la suma de desviaciones al cuadrado de las concentraciones de iones en la solución nutritiva (SN) respecto a la ideal (SN₀). La función objetivo que se plantea es, por tanto, la siguiente:

$$FO = \min S = \sum_{j=1}^{N_j} \vec{f}(j) \cdot (\overrightarrow{Cme}_{SN}(j) - \overrightarrow{Cme}_{SN_0}(j))^2 \quad (5)$$

El vector $\vec{f}(j)$ es un factor de ponderación que puede introducirse para priorizar el ajuste de cada uno de los iones mediante la asignación de pesos relativos proporcionales al papel de cada ion en la solución nutritiva. En el ejemplo realizado se han asignado pesos iguales a todos los iones, lo que significa que no se prioriza ningún ion en concreto. En este trabajo, no se ha considerado en la función objetivo el ajuste del pH de la SN.

2.1.2 Restricciones.

La función objetivo descrita está sometida a las siguientes restricciones:

- a) Restricciones de no negatividad.

Las concentraciones de fertilizantes aportadas tienen que ser mayor o igual que cero.

$$\overrightarrow{Cmm}^T(i) \geq \mathbf{0}, \forall i = 1..N_i \quad (6)$$

b) Restricciones de concentración mínima de iones en la solución.

Se imponen para garantizar que la concentración de los iones en la solución es igual o mayor a la concentración de dicho ion en la solución ideal.

$$\overrightarrow{Cme}_{SN}(j) \geq \overrightarrow{Cme}_{SN_0}(j), \forall j = 1..N_j \quad (7)$$

Finalmente, el modelo varía la fracción de mezcla (α) desde 0 hasta 1 con intervalos de 0,05 y para uno de dichas fracciones resuelve el problema de optimización descrito por las ecuaciones 5 a 7, obteniéndose para cada caso la combinación óptima de fertilizantes que proporcionan el ajuste óptimo entre la solución nutritiva y la ideal

2.1.3 Coste y CE de la solución óptima.

Conocida la concentración de fertilizante añadida a la SN, el modelo permite calcular el coste de cada fertilizante i , en € m^{-3} , conociendo el precio de éste ($p(i)$), en € kg^{-1} , mediante la siguiente expresión:

$$\vec{c}(i) = \frac{\overrightarrow{Cmm}^T(i) \cdot Mm(i)}{1000} \cdot p(i) \quad (8)$$

Finalmente, el coste total de la fertilización se calcular como la suma de los costes de cada uno de los abonos añadidos.

$$c_F = \sum_{i=1}^{N_i} \vec{c}(i) \quad (9)$$

Por otro lado, el modelo permite estimar la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (CE_{SN}) a partir de la concentración de sales aportadas por los fertilizantes a la solución y de la conductividad de las aguas desalada y convencional mediante la siguiente ecuación:

$$CE_{SN} = \sum_{j=1}^{N_j} \frac{\overrightarrow{Cme}_{SN}(j)}{10} + \alpha \cdot CE_{AD} + (1 - \alpha) \cdot CE_{AC} \quad (10)$$

2.2. Algoritmos de optimización utilizados.

El modelo desarrollado va a utilizar métodos de optimización no lineal y algoritmos evolutivos para resolver el problema propuesto.

Para manejo más fácil por el usuario el programa se ha desarrollado sobre una hoja de cálculo Microsoft Excel© [11], utilizando el lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA) desarrollado por Microsoft. Se han utilizado los algoritmos de optimización disponibles en el complemento Solver© [12], integrado dentro de la plataforma Ms Excel.

Solver ofrece varios algoritmos de optimización, de los cuales el algoritmo Simplex LP se descarta debido a que se aplica a problemas de optimización lineal, y no se adapta al problema propuesto. Los otros dos algoritmos que pueden aplicarse a problemas no lineales son los siguientes:

- CRG Nonlinear: es la opción de cálculo predeterminada en EXCEL, y es un método de optimización que usa el algoritmo GRG2 [13], basado en el método del gradiente que se puede aplicar a problemas no lineales.
- Evolutionary: Se trata de un método heurístico basado en algoritmos evolutivos. Estos algoritmos son genéricos, se adaptan a casi cualquier problema de optimización, y permiten encontrar una solución próxima al óptimo, si bien no necesariamente óptima, mediante un conjunto de reglas simples que imitan el proceso biológico de evolución de las especies. En el algoritmo genético, las variables son codificadas en una serie de cadenas de bits que imitan a un cromosoma y a los individuos de cada generación se les aplica una serie de operadores simples como mutación, cruzamiento o selección, de forma que una población inicial de soluciones (individuos) generados aleatoriamente se vaya mejorando sucesivamente hasta conseguir una solución casi óptima con el paso de determinado número de generaciones [14].

2.3. Estructura del modelo.

El programa se ha desarrollado sobre un libro de Ms Excel. La pantalla principal de la aplicación tiene la apariencia de la Figura 1:

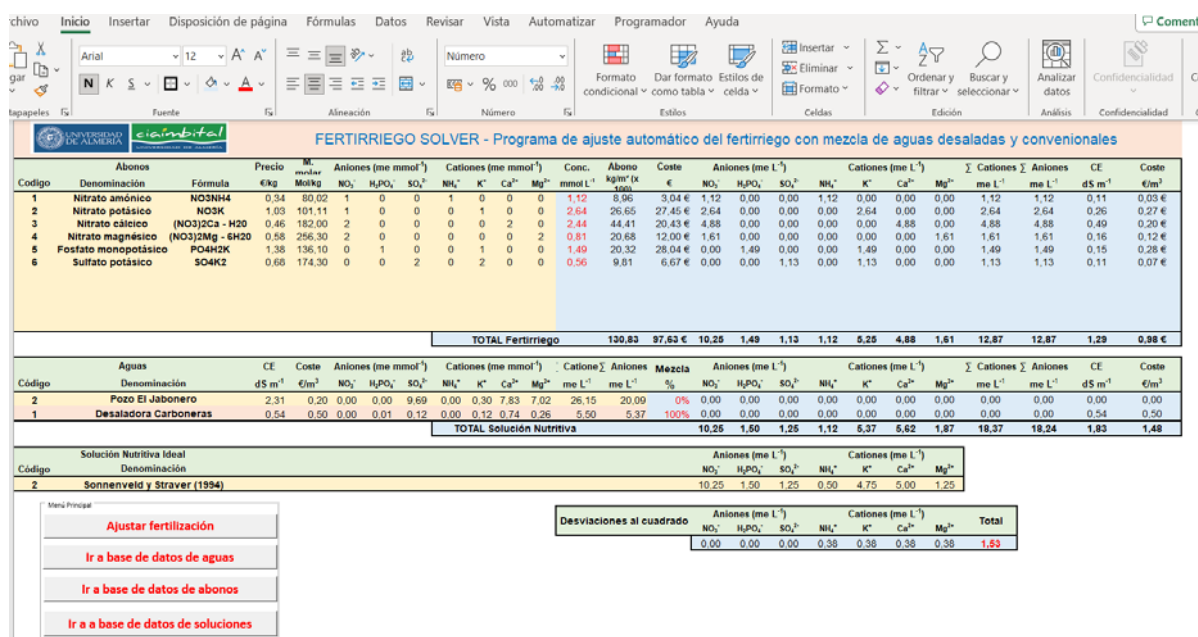


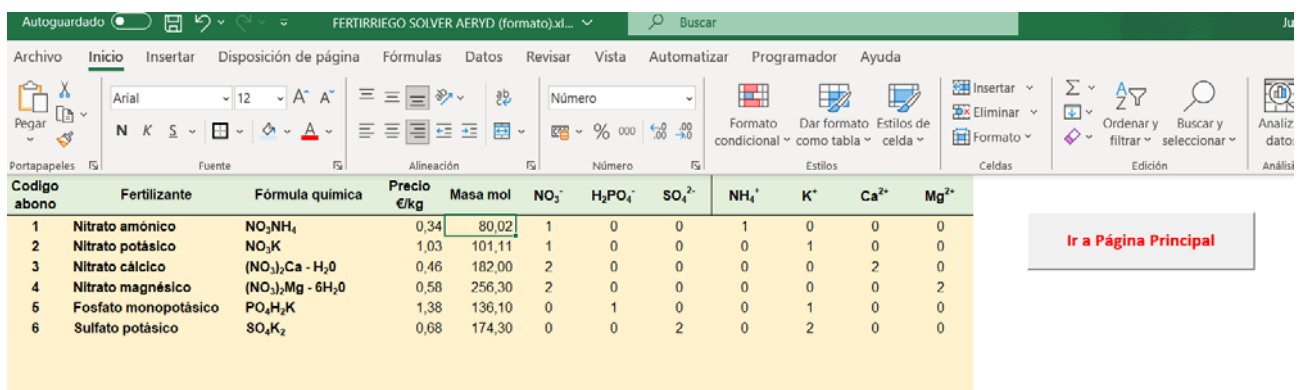
Figura 1. Pantalla principal de la aplicación desarrollada.

En el recuadro superior se seleccionan los abonos que se van a utilizar para ajustar la SN. Estos abonos pueden seleccionarse de una base de datos de abonos disponible en la aplicación insertando el código del fertilizante. La información asociada a cada fertilizante se recupera automáticamente de dicha base de datos. La variable independiente que se va a optimizar se encuentra en la columna con letras rojas y corresponde a la concentración a aportar de cada abono, en mmol L^{-1} . En la siguiente columna se traduce a kg de abono por cada m^3 de solución concentrada ($\times 100$). Las siguientes columnas son resultados en los que se calcula la concentración, en meq L^{-1} de cada uno de los iones aportados, la CE eléctrica estimada a partir de dicha concentración de iones y el coste de cada abono por m^3 . La fila inferior de dicha tabla muestra los resultados totales.

Más abajo en la siguiente tabla se pueden seleccionar el agua desalada y el agua de pozo a utilizar lo que se realiza automática introduciendo el código correspondiente de sendas bases de datos en las que se almacenan los datos correspondientes a la composición de dichas aguas, su precio y CE. En función de los porcentajes de mezclas, en la fila inferior, se calculan la cantidad de nutrientes aportados por ambas aguas, así como su coste y CE. En la tabla inferior se puede seleccionar la solución nutritiva ideal a partir de la información recogida en la base de datos de soluciones nutritivas. Como puede comprobarse, la aplicación permite seleccionar los abonos y aguas a utilizar, así como la solución ideal a obtener de entre todos los almacenados en las bases de datos que la aplicación permite crear.

Finalmente, se calculan las desviaciones cuadráticas entre la solución nutritiva y la solución ideal que el algoritmo de optimización va a utilizar como función objetivo a minimizar. En esta pantalla principal, mediante un menú de botones, se puede ejecutar el programa de optimización o acceder a las diferentes bases de datos para editar o añadir los registros correspondientes. Al pulsar el botón correspondiente a ejecutar, se pone en marcha una macro programada en VBA, que varía automáticamente el porcentaje de mezcla de aguas y para cada valor de mezcla resuelve el problema de optimización mediante los dos modelos de optimización proporcionados por el Solver. Al comenzar y terminar el algoritmo de optimización se consulta la hora del sistema permitiendo, por diferencia, conocer el tiempo que empleado por cada algoritmo en encontrar la solución.

A modo de ejemplo, en la figura 2, se muestra una de las bases de datos de la aplicación



Código abono	Fertilizante	Fórmula química	Precio €/kg	Masa mol	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
1	Nitrato amónico	NO_3NH_4	0,34	80,02	1	0	0	1	0	0	0
2	Nitrato potásico	NO_3K	1,03	101,11	1	0	0	0	1	0	0
3	Nitrato cálcico	$(\text{NO}_3)_2\text{Ca} \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,46	182,00	2	0	0	0	0	2	0
4	Nitrato magnésico	$(\text{NO}_3)_2\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,58	256,30	2	0	0	0	0	0	2
5	Fosfato monopotásico	$\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$	1,38	136,10	0	1	0	0	1	0	0
6	Sulfato potásico	SO_4K_2	0,68	174,30	0	0	2	0	2	0	0

Figura 2. Base de datos de abonos.

3. Resultados y discusión

3.1. Caso de estudio.

Para testear su funcionamiento el modelo se ha aplicado a un caso de estudio real. Se ha considerado que un agricultor que dispone de una finca de cultivo hortícola intensivo bajo invernadero en el paraje El Jabonero, 04100, Níjar (Almería). Dicho agricultor se abastece de agua procedente del pozo “El Jabonero” situado en dicho paraje y, al mismo tiempo, dispone de una toma de agua desalada procedente de la Planta Desaladora de Carboneras. Las características de dichas aguas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las aguas utilizadas en el caso de estudio

Código	Aguas	CE	Coste	Aniones (meq L ⁻¹)			Cationes (meq L ⁻¹)			
		dS m ⁻¹	€ m ⁻³	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
2	Pozo El Jabonero	2,31	0,20	0,00	0,00	9,69	0,00	0,30	7,83	7,02
1	Desaladora Carboneras	0,54	0,50	0,00	0,01	0,12	0,00	0,12	0,74	0,26

Se han seleccionado un total de 6 abonos para ajustar la SN cuyas características se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los abonos utilizados en el caso de estudio.

Código	Fertilizante	Fórmula	Precio	M. molar	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
			(€ kg ⁻¹)	(g mol ⁻¹)	(meq mmol ⁻¹)						
1	Nitrato amónico	NH ₄ NO ₃	0,34	80,02	1	0	0	1	0	0	0
2	Nitrato potásico	K NO ₃	1,03	101,11	1	0	0	0	1	0	0
3	Nitrato cálcico	Ca (NO ₃) ₂ -H ₂ O	0,46	182,00	2	0	0	0	0	2	0
4	Nitrato magnésico	Mg (NO ₃) ₂ - 6H ₂ O	0,58	256,30	2	0	0	0	0	0	2
5	Fosfato Mono potásico	H ₂ K PO ₄	1,38	136,10	0	1	0	0	1	0	0
6	Sulfato potásico	K ₂ SO ₄	0,68	174,30	0	0	2	0	2	0	0

La solución nutritiva ideal elegida para el fertirriego del cultivo es la propuesta por Sonneveld y Straver en 1994 [15], recomendada para cultivos hortícolas y, especialmente, para el tomate (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Solución nutritiva ideal utilizada en el estudio.

Código	Solución Ideal	Aniones (meq L ⁻¹)			Cationes (meq L ⁻¹)			
		NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
2	Sonneveld y Straver (1994)	10,25	1,50	1,25	0,50	4,75	5,00	1,25

3.2. Evaluación de los algoritmos de optimización.

Las ejecuciones del modelo se han realizado en un equipo con las características que se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del equipo informático.

Característica	Descripción
Modelo	Ordenador portátil HP Elitebook 850 G6
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz 1.99 GHz
RAM instalada	16,0 GB (15,8 GB usable)
Tipo de sistema	Sistema operativo, procesador basado en x64
Sistema operativo	Windows 10 Enterprise (64 bits), versión 22H2
Versión Excel	Microsoft® Excel® 365 MSO (versión 2308 compilación 16.0.16731.20182) de 64 bits

La solución encontrada por ambos algoritmos ha sido prácticamente la misma para las 20 ejecuciones realizadas con diferentes valores de mezcla. Este resultado ha sido bastante sorprendente ya que en todas las simulaciones el algoritmo genético ha alcanzado la solución óptima, pese a que se trata de un método que, en teoría, no lo garantiza.

En la Figura 3 se comparan los resultados obtenidos por ambos algoritmos de optimización en función de la CE de la solución nutritiva óptima. Se observa que las soluciones han sido prácticamente idénticas con un coeficiente de determinación R^2 igual a la unidad. Se trata, por tanto, de 2 algoritmos que han demostrado ser muy robustos para la solución del problema planteado.

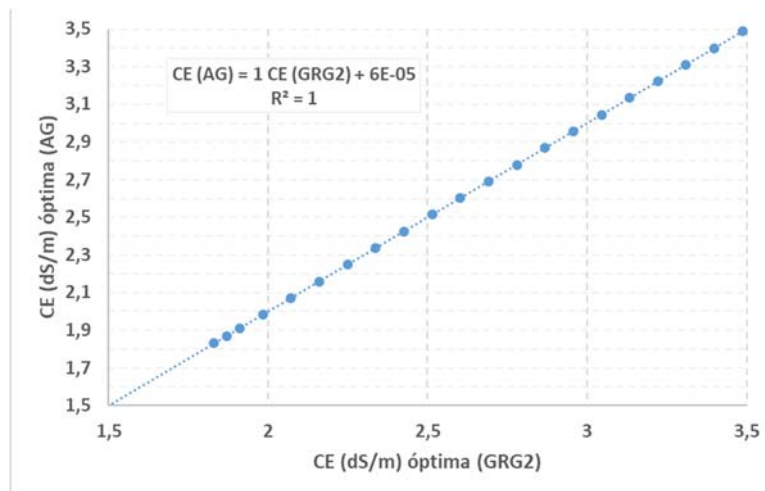


Figura 3. Relación entre CE de la solución nutritiva encontrada por el algoritmo GRG2 (eje de abscisas) y el algoritmo Genético (eje de ordenadas).

No obstante, y pese a que la gran precisión de ambos en la búsqueda de soluciones, el algoritmo GRG2 ha superado claramente al algoritmo Genético en lo que se refiere a velocidad de cálculo y al tiempo de convergencia a la solución final, que constituye el talón de Aquiles de este último.

Las Figuras 4 y 5 representan las frecuencias absolutas y acumuladas de los tiempos de ejecución para el algoritmo GRG2 y el Genético, respectivamente.

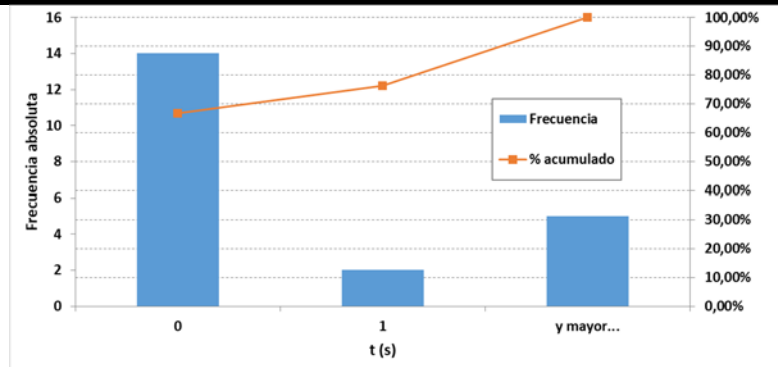


Figura 4. Frecuencias absolutas y acumuladas de los tiempos de ejecución del algoritmo GRG2.

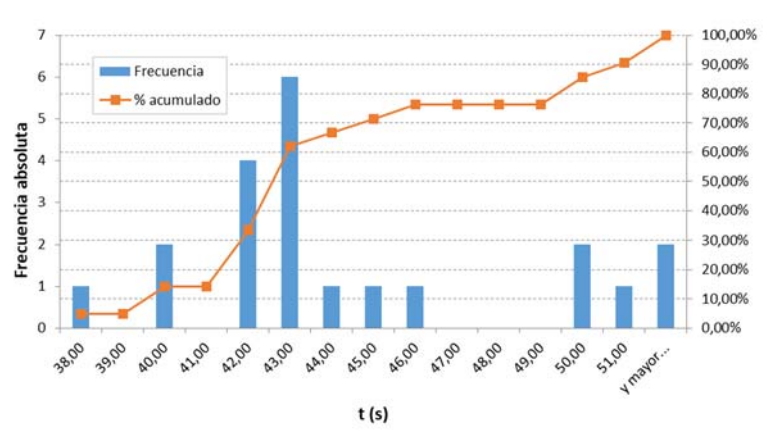


Figura 5. Frecuencias absolutas y acumuladas de los tiempos de ejecución del algoritmo Genético

Como se puede comprobar, el tiempo de ejecución del algoritmo GRG2 ha sido inferior a 1 s en 14 de las 20 ejecuciones del algoritmo (casi un 70%), mientras que en el resto ha superado dicho tiempo por muy poco. El tiempo medio calculado ha sido de tan sólo 0,33 s. Por el contrario, el algoritmo Genético ha necesitado tiempos de ejecución considerablemente mayores. Al tratarse de un algoritmo con una fuerte componente aleatoria, el tiempo de cálculo ha variado entre un mínimo de 38 s y un máximo de 73 s. El tiempo de ejecución medio se ha situado en 45,43 s con una desviación típica de 7,86 s y un coeficiente de variación del 17,3%. En términos relativo el tiempo necesario para alcanzar la solución en el algoritmo evolutivo ha sido de media 137,6 veces mayor.

3.3. Análisis de los resultados.

La figura 6 muestra la evolución de la C.E. óptima de la solución nutritiva (en rojo) en función del porcentaje de mezcla, así como la procedencia de dicha C.E. Se observa que conforme aumenta la fracción de agua desalada en la mezcla, la C.E. de la solución nutritiva disminuye de forma prácticamente lineal. El fuerte descenso de la C.E. de la solución procede fundamentalmente de la menor aportación de sales del agua de pozo (línea azul) conforme disminuye la fracción de ésta. Aunque la CE aportada por el agua desalada aumenta (en verde), este incremento es muy ligero debido a la poca salinidad del agua desalada. Finalmente, la CE aportada por los fertilizantes (línea marrón) permanece prácticamente constante.

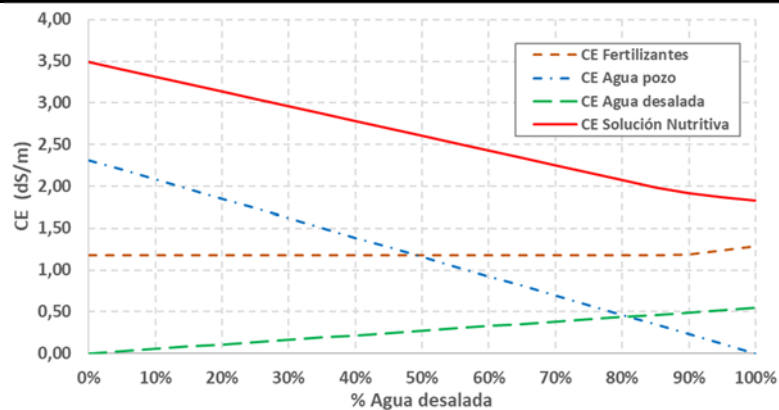


Figura 6. Evolución de la CE en función del porcentaje de mezcla

Este comportamiento se explica debido a que el agua de pozo no aporta prácticamente casi ningún ion útil para la nutrición del cultivo, por lo que un aumento del agua de pozo no contribuye a reducir la aportación de sales requeridas por medio de la fertirrigación. Aun cuando, en general, consideramos recomendable el uso conjunto de aguas desaladas y convencionales para reducir la aportación de fertilizantes mediante fertirrigación, la eficacia de esta práctica va a depender mucho de la composición química del agua de pozo y de los nutrientes que realmente dicha agua aporte, que en este caso son muy pocos.

Otro aspecto de gran importancia es el coste final de la solución nutritiva en función de la mezcla de agua desalada y de pozo y de los fertilizantes requeridos. La Figura 7 muestra la evolución de los diferentes costes que componen la solución nutritiva en función de dicho porcentaje de mezcla. Se observa que el coste total de la solución nutritiva (línea roja) experimenta un moderado crecimiento conforme aumenta el porcentaje de agua desalada utilizada. Dicho incremento de coste se debe fundamentalmente al mayor precio de dicha agua desalada (Línea verde). Este incremento es sólo parcialmente compensado por la reducción de costes del agua de pozo (Línea azul). Respecto al coste de los fertilizantes (Línea marrón), se ha mantenido aproximadamente constante con una ligerísima tendencia a la baja, excepto al final cuando se utiliza una proporción muy elevada de agua desalada que tiende a aumentar ligeramente. Este comportamiento se debe, como se ha comentado antes, a la composición del agua del pozo, que, al no aportar nutrientes a la planta, impide que se pueda conseguir una reducción significativa del coste de los fertilizantes cuando se incrementa su uso.

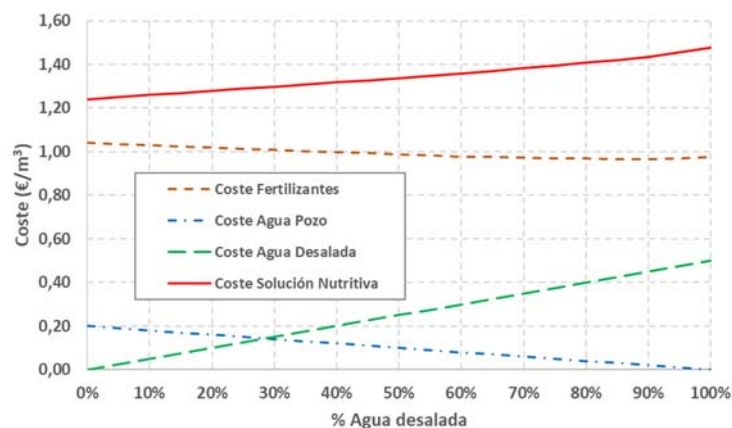


Figura 7. Evolución del coste de la solución nutritiva en función del porcentaje de mezcla

Como conclusión cabe señalar que, en el caso analizado, parece conveniente utilizar mezclas elevadas de agua desalada, ya que, aunque se produce un incremento del precio de la solución nutritiva, dicho incremento es moderado y el uso de agua de pozo no supone una reducción importante del coste de los fertilizantes y, por el contrario, aporta sales que no contribuyen a la nutrición de la planta y que, en cambio, incrementan notablemente la salinidad de la solución nutritiva, con la consiguiente reducción de la producción del cultivo y el mayor riesgo de contaminación por los retornos de riego con una elevada carga salina.

4. Conclusiones

Como conclusiones de lo expuesto en este trabajo cabe mencionar las siguientes:

- Se ha realizado un modelo de optimización del manejo de la fertirrigación con mezclas de agua desalada y convencional, que se ha aplicado a un caso práctico real de una explotación de cultivos intensivos en la comarca de Níjar en Almería
- Los resultados confirman la precisión y robustez de los dos métodos de empleados para resolver este tipo de problemas, ya que, ambos han logrado encontrar la solución óptima que mejor ajusta la fertirrigación del sistema. No obstante, el método de programación no lineal GRG2 ha superado al Algoritmo Genético en lo que respecta a la velocidad de convergencia a la solución óptima ya que ha requerido mucho menor tiempo y esfuerzo computacional en encontrarla.
- El modelo permite estimar el coste y la CE de la solución nutritiva y la contribución de cada uno de los elementos que la componen (agua desalada, pozo y fertilizantes) en función del porcentaje de mezcla, por lo que permite adoptar decisiones racionales sobre el uso óptimo de dichos recursos.
- En el caso estudiado, parece aconsejable utilizar proporciones elevadas de agua desalada, ya que, aunque se produce un incremento moderado del precio de la solución nutritiva, se reduce considerablemente su CE con la consiguiente mejora de la producción del cultivo y el menor riesgo de contaminación por los retornos de riego.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto PID2020-118492RB-C21 "OPTIMIZACION DEL FERTIRRIEGO EN CULTIVOS HIDROPONICOS CON MEZCLA DE AGUA DESALINIZADA Y AGUAS CONVENCIONALES, Y CON REUTILIZACION CONTROLADA DEL AGUA Y LOS NUTRIENTES

6. Referencias

- [1] J. A. Sánchez, J. Reca, y J. Martínez, «Irrigation Water Management in a Mediterranean Greenhouse District: Irrigation Adequacy Assessment», *Irrigation and Drainage*, vol. 64, n.º 3, pp. 299-313, 2015, doi: 10.1002/ird.1908.
- [2] J. A. Sánchez, J. Reca, y J. Martínez, «Water productivity in a mediterranean semi-arid greenhouse district», *Water Resources Management*, vol. 29, n.º 14, pp. 5395-5411, 2015, doi: 10.1007/s11269-015-1125-5.
- [3] J. Reca, C. Trillo, J. A. Sánchez, J. Martínez, y D. Valera, «Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources», *Agricultural Systems*, vol. 166, pp. 173-183, oct. 2018, doi: 10.1016/j.agsy.2018.02.004.

-
- [4] B. Gallego-Elvira, J. Reca, B. Martín-Gorriz, J. F. Maestre-Valero, y V. Martínez-Alvarez, «Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions», *Agricultural Water Management*, vol. 255, 2021, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107012.
 - [5] R. Baños, C. Gil, J. Reca, y F. G. Montoya, «A memetic algorithm applied to the design of water distribution networks», *Applied Soft Computing Journal*, vol. 10, n.º 1, pp. 261-266, 2010, doi: 10.1016/j.asoc.2009.07.010.
 - [6] J. Reca, J. Martínez, C. Gil, y R. Baños, «Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks», *Water Resources Management*, vol. 22, n.º 10, pp. 1367-1379, 2008, doi: 10.1007/s11269-007-9230-8.
 - [7] J. Reca y J. Martínez, «Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks», *Water Resources Research*, vol. 42, n.º 5, 2006, doi: 10.1029/2005WR004383.
 - [8] V. Zavala, R. López-Luque, J. Reca, J. Martínez, y M. T. Lao, «Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system», *Applied Energy*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114261.
 - [9] J. I. Monís, R. López-Luque, J. Reca, y J. Martínez, «Multistage bounded evolutionary algorithm to optimize the design of sustainable photovoltaic (PV) pumping irrigation systems with storage», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n.º 3, 2020, doi: 10.3390/su12031026.
 - [10] M. Urrestarazu, *Tratado de cultivo sin suelo*. 2004. doi: 10.13140/RG.2.1.4853.2645.
 - [11] Microsoft Corporation, «Microsoft Excel». 24 de septiembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://office.microsoft.com/excel>
 - [12] D. Fylstra, L. Lasdon, J. Watson, y A. Waren, «Design and Use of the Microsoft Excel Solver», *Interfaces*, vol. 28, n.º 5, pp. 29-55, oct. 1998, doi: 10.1287/inte.28.5.29.
 - [13] L. S. Lasdon, A. D. Waren, A. Jain, y M. Ratner, «Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming», *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 4, n.º 1, pp. 34-50, mar. 1978, doi: 10.1145/355769.355773.
 - [14] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
 - [15] C. Sonneveld y N. A. Straver, «Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates», 1988.