

PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA EL CÁLCULO DE SOLUCIONES NUTRITIVAS

**L. Martínez-Corral¹;
E. Martínez-Rubin de Celis²;
F. G. Flores-García¹; P. Preciado-Rangel²;
H. Zermeño-González²; R. D. Valdez-Cepeda³**

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna, Blvd. Revolución y Czda. Cuauhtémoc s/n, Torreón, Coahuila, C. P. 27000, MÉXICO.

Correo-e: luime_mc18@yahoo.com.mx (*Autor responsable)

²Instituto Tecnológico de Torreón, Torreón, Coahuila, MÉXICO.

³Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo, Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO.

RESUMEN

Se desarrolló un programa de cómputo para la formulación de soluciones nutritivas basado en el método universal propuesto por Steiner. El sistema contiene un módulo de cálculo que permite configurar la fórmula según la relación entre aniones y cationes, la concentración iónica total y el pH deseado. La interfaz incluye el ajuste automático de los aportes de la composición química del agua de riego así como la gestión de una base de datos que permite diferentes combinaciones de fertilizantes y el acceso del usuario a la configuración de fuentes de nutrientes según los tenga a su alcance. Con ello se incrementa la portabilidad del sistema y se facilita el cómputo de soluciones. Con base en los resultados, el sistema presenta mayor flexibilidad al eliminar los problemas asociados a los cálculos manuales y las restricciones a las que actualmente se encuentran sujetos los algoritmos y las hojas de cálculo tradicionales enfocadas a este fin. El programa de cómputo desarrollado se encuentra disponible en forma gratuita a la comunidad científica mediante solicitud al autor.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: fertilización, nutrición vegetal, agricultura protegida.

SOFTWARE FOR THE COMPUTE OF NUTRITIOUS SOLUTIONS

ABSTRACT

A Software was developed for the formulation of nutrient solutions based on the universal method proposed by Steiner. The system contains a calculation module that allows to configure the formula according to the anion:cation ratio, total ionic concentration and the required pH. The interface includes automatic adjustment of the contributions of the chemical composition of the water for crop irrigation, as well as the management of a database that allows different combinations of fertilizers. User can access to a configuration menu to choose nutrient sources increasing by this way the portability of the system and facilitating the computation of solutions. By taking into account the results, the system presents more flexibility when eliminating the problems associated to the manual calculations and the restrictions to those that at the moment are subject the algorithms and the traditional spreadsheet focused to this end.

ADDITIONAL KEY WORDS: fertilization, plant nutrition, protected agriculture.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la horticultura existe una tendencia hacia la producción intensiva, con el objetivo de aumentar la productividad y la calidad. Esta tendencia conduce, en muchos casos, a un uso poco eficiente de los recursos naturales, entre ellos el del agua y de los nutrientes. Las técnicas de cultivo sin suelo o hidropónicas son reconocidas como un componente importante en la agricultura que optimiza el abastecimiento hídrico y las dosis de fertilización

en los cultivos (Steiner, 1961; Baille, 1999; Preciado-Rangel *et al.*, 2006). Sin embargo, uno de los principales problemas para la adopción del fertiriego es el desconocimiento de los parámetros para la generación de la solución nutritiva y la forma de suministrar los fertilizantes eficientemente.

La incursión de innovaciones tecnológicas en la agricultura ha permitido contar con mecanismos automáticos de cálculo de soluciones nutritivas que abarcan desde hojas de cálculo, cuya simplicidad

confronta al usuario con diversos contratiempos para la formulación, hasta sistemas que amplían su flexibilidad al presentar posibilidades de cálculo de una solución partiendo de una fórmula estándar previamente diseñada que se ajusta de acuerdo con los requerimientos del cultivo dependiendo del desarrollo, etapa y condiciones de crecimiento (Sonneveld *et al.*, 1999). El grado de complejidad que se puede llegar a alcanzar se extiende a los sistemas expertos basados en el conocimiento (Corona-Saenz *et al.*, 2000). Estos sistemas realizan un diagnóstico nutrimental; sin embargo, se encuentran diseñados para un cultivo en particular lo que limita su utilización. Por otro lado, los sistemas no expertos abiertos a diferentes cultivos presentan limitaciones de diversa índole; por ejemplo, las restricciones al usuario para acceder a diferentes fuentes de fertilizantes según las tenga a su alcance, o simplemente efectuar una composición que no se encuentre alineada bajo una formulación estándar o de un autor en específico.

La cantidad y diversidad de soluciones nutritivas formuladas es considerable, difiriendo entre sí en la relación de concentración y combinación de sales (Steiner, 1961; Sonneveld *et al.*, 1999; Preciado-Rangel *et al.*, 2006). Esta gran variabilidad no permite el diseño de una solución nutritiva adecuada común a todos los cultivos (Juárez-Hernández *et al.*, 2006; Preciado-Rangel *et al.*, 2006).

Con base en lo anterior se planteó la necesidad de diseñar un sistema computarizado que recopilara información bibliográfica y el conocimiento de especialistas para proporcionar la asesoría adecuada al tomar una decisión en un diagnóstico nutrimental.

El objetivo del trabajo fue generar un programa de cómputo que sirva como guía en el cálculo de soluciones nutritivas satisfaciendo ciertos requerimientos en la relación de aniones / cationes, la concentración iónica total y el pH de la composición, de modo que resulte en una herramienta auxiliar en la formulación de cualquier solución nutritiva independiente de las características del método de siembra, estado fenológico del cultivo y la experiencia del usuario en las relaciones agua-suelo-planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema fue diseñado bajo la plataforma Visual Basic 6 (Microsoft Corp., Redmond, WA) para Windows 98, XP y NT utilizando el proceso de programación del software el modelo incremental (Pressman, 1998). El principio de operación está basado en el método universal de preparación de soluciones nutritivas propuesto por Steiner (Steiner, 1961.).

Según Steiner (1961), la composición química de una solución nutritiva está determinada por: a) el pH, b)

la concentración total iónica (presión osmótica) y c) las relaciones mutuas entre los aniones y los cationes. La secuencia metodológica que se siguió en el diseño de los algoritmos utilizados en el sistema fue: 1) selección de la solución nutritiva, 2) ajuste del pH y 3) ajuste de los macroelementos y microelementos.

Selección de la solución nutritiva

La solución nutritiva está caracterizada por el valor de la conductividad eléctrica (CE) dada en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, los macroelementos expresados en $\text{me}\cdot\text{litro}^{-1}$ y los microelementos en $\text{mg}\cdot\text{litro}^{-1}$. Para determinar la presión osmótica (PO) de la solución nutritiva se utilizó (Preciado-Rangel *et al.*, 2006):

$$\text{PO} = \text{CE} \times 0.36 \quad [1]$$

y la concentración total de iones (Preciado-Rangel *et al.*, 2006):

$$\text{Concentración de iones} = \frac{\text{PO}}{0.024} \quad [2]$$

Las concentraciones dadas por los macroelementos corresponden a una relación aniónica expresada por $\text{A}^- = \sum(\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{SO}_4^{2-})$ y a una relación catiónica denominada $\text{C}^+ = \sum(\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$. Una solución nutritiva puede ser calculada sólo si la relación entre los aniones y los cationes $\text{A}^-:\text{C}^+$, ocurre en el intervalo de $\pm 10\%$.

Ajuste del pH

Para que un cierto pH pueda ser obtenido en una solución, de acuerdo a la metodología de Steiner (1961) es necesario modificar la cantidad de H_2PO_4^- ya presente en la solución y el exceso de iones OH^- , lo que traería como consecuencia variaciones en las proporciones relativas de los cationes, de aquí que la relación H_2PO_4^- y OH^- se vea influenciada especialmente por la proporción $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}$. En función de los datos, se generaron las curvas de los desplazamientos que sufre la relación pH: H_2PO_4^- debido a la razón $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}$; el pH es ajustado de acuerdo con siete diferentes relaciones $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}$.

Ajuste de los macro y microelementos

En el ajuste de los $\text{me}\cdot\text{litro}^{-1}$ de cada fertilizante, el cálculo de las concentraciones se inicia cubriendo los nutrientes que son administrados por una sola fuente de sales, considerando que todo aporte que haga ese fertilizante no rebasa lo requerido por la solución nutritiva para ningún ion; no obstante, si se calcula cualquier contribución que haga ese compuesto a otro nutriente, cantidad que se resta al aporte total previsto. Este algoritmo es implementado mediante ciclos anidados los cuales ajustan automáticamente las fuentes de fertilizantes de acuerdo con el aporte menor.

Si el agua con la que se va a formular la solución contiene elementos nutritivos, el algoritmo realiza un ajuste con respecto a la calidad del agua deduciendo las cantidades de los elementos aportados de los nutrientes que deben ser suministrados por la solución. El cálculo para los microelementos se lleva a cabo de forma independiente del de los macroelementos y se efectúa mediante una solución al 5 % de Fe EDDHA, 32 % de Mn, 25 % de Cu, 23 % de Zn, 11 % de B y 40 % de Mo de la concentración requerida (Preciado-Rangel *et al.*, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra la pantalla inicial del sistema; desde aquí es posible iniciar la formulación de una nueva solución nutritiva, consultar los libros en pantalla, información de los autores o bien, salir de la aplicación. Los libros en pantalla son una herramienta de consulta incluida en el software que permite obtener información general de cómo preparar una solución nutritiva, ejemplos de cálculos y referencias bibliográficas.

Al iniciar el cálculo de una nueva solución el primer cuadro de diálogo que se despliega es el de configuración de parámetros, que permite al usuario establecer dos de los parámetros de caracterización de la solución nutritiva: el pH y la concentración total de iones. Este último parámetro puede ser definido ya sea mediante el conocimiento de la presión osmótica, la conductividad eléctrica o directamente de la concentración iónica total deseada; al definir cualquiera de los tres valores, el sistema se encargará de calcular las otras dos referencias; si el valor del pH no es introducido, la solución será calculada teóricamente sin ajuste de pH. En la parte inferior del cuadro de diálogo se encuentra la especificación de la relación pH: H_2PO_4^- (o dependencia OH^- : H_2PO_4^-) la cual puede ser definida por el usuario o bien, calculada automáticamente por el sistema con base en la relación de curvas $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}$ implícitas en el algoritmo. Para

la formulación de las soluciones se suministran tres macronutrientos en forma de aniones (nitratos, fosfatos y sulfatos) y tres en forma catiónica (potasio, calcio y magnesio). Estas concentraciones corresponden a una relación aniónica $\text{NO}_3^-:\text{H}_2\text{PO}_4^-:\text{SO}_4^{2-}$ y una relación catiónica $\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ y son solicitadas al usuario en me·litro⁻¹. Como las plantas han demostrado que pueden captar iones a muy bajas concentraciones, fue necesario introducir una restricción de un valor mínimo de concentración, bajo el cual la absorción no es posible o asimilable por la planta; en el otro extremo, se introdujo un valor máximo de concentración para evitar toxicidad o consumo en exceso; gráficamente, estos límites se encuentran representados en el triángulo de relaciones aniónicas/catiónicas de la pantalla de preparación de soluciones (Figura 2).

En la preparación de soluciones nutritivas, todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua, no obstante, algunas veces ciertas sales no están disponibles, entonces es necesario sustituir algunas fuentes o disponer de otras nuevas. Para esto, el sistema cuenta con una base de datos interactiva que le permite al usuario agregar, modificar o eliminar fuentes de fertilizantes para la formulación de una solución nutritiva. En la edición de esta base de datos, no es necesario abandonar el sistema ya que puede ser modificada dentro del mismo; sin embargo, si se prefiere, los registros pueden ser accesados desde programas alternos como Excel o Bloc de notas (Figura 3a). La ventana de selección de fertilizantes (con las fuentes nutrimentales configuradas en la base de datos) ofrece al usuario la opción de escoger según su conveniencia la fuente de nutrientes (Figura 3b).

Una vez tomada la decisión de la solución nutritiva a utilizar, se calculan las cantidades necesarias de fertilizante para cubrir las concentraciones de los nutrientes de la solución. La calculadora de soluciones nutritivas incluida



FIGURA 1. Pantalla inicial del sistema.

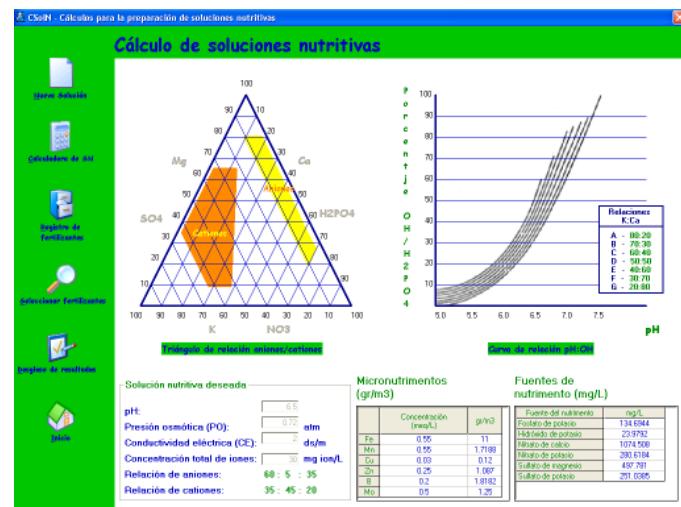
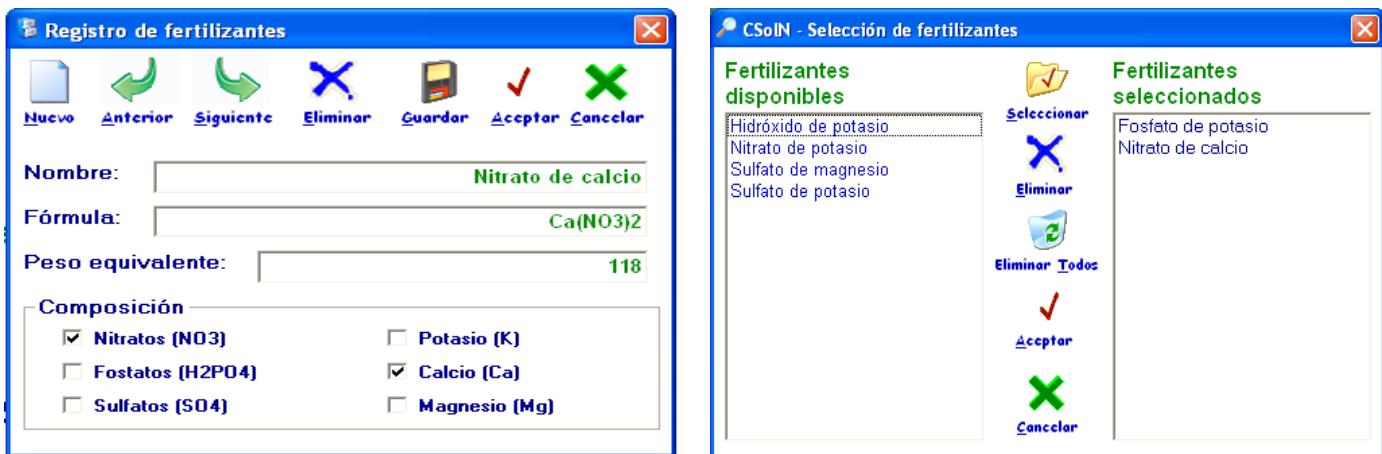


FIGURA 2. Pantalla de preparación de soluciones nutritivas.



en el sistema, deduce automáticamente las aportaciones de cada fertilizante según la caracterización de dicha solución que el usuario especificó en los diversos cuadros de diálogo. La estimación de las concentraciones de cada fuente se complementa con una pantalla de resultados dentro de la cual se desglosan los puntos que pudieran resultar de interés en la formulación de la solución entre los que se encuentran: la relación de aniones / cationes deseada (en me·litro⁻¹ y en porcentajes), el pH y su ajuste, presión osmótica, conductividad eléctrica, la concentración de cada ion, la concentración total de iones (mg·ion⁻¹·litro⁻¹), la calidad del agua, solución nutritiva propuesta y la fuente de fertilizantes con sus aportes (macronutrientos y micronutrientos).

La presentación de resultados se efectúa en dos pantallas; en la pantalla de preparación de soluciones nutritivas (con los aportes calculados para los micro y los macronutrientos) y en la pantalla de resultados, diseñada para efecto de un reporte detallado de los cálculos, de los requerimientos de la fórmula solicitada, calidad del agua de riego, los ajustes de los diferentes parámetros, las aportaciones parciales del fertilizante (para cada ion) y la aportación final a la fórmula así como la concentración de micronutrientos (Figura 4). Si se desea una copia física de la información, la pantalla cuenta con un comando para la vista preliminar del reporte y otro de impresión estándar del mismo. Una herramienta adicional que fue configurada es la asistencia al usuario mediante la ayuda en línea; desde cualquier parte del sistema la presión de la tecla <F1> despliega una ventana de ayuda de navegación del sistema.

El formato actual del sistema no presenta el desglose de la relación N-NH₄/N-NO₃.

CONCLUSIONES

El sistema desarrollado es una herramienta en el cálculo de soluciones nutritivas que permite obtener una



solución que satisface: a) la relación entre cationes, b) la relación entre aniones, c) el pH y d) la concentración total de iones. Los algoritmos implementados reducen las dificultades de cálculo al exhibir protecciones en casos de desequilibrio iónico, fuera de intervalos, automatismos en el ajuste del pH y cuadros de ayuda en cualquier situación del sistema. A diferencia de algunos otros sistemas existentes, la flexibilidad de las rutinas programadas, permiten la interacción del usuario mientras le brinda la oportunidad de programar fácilmente la solución según las características fenológicas del cultivo y los factores climáticos a los que se encuentre sujeto; de igual modo, la base de datos especializada en la gestión de fertilizantes, le concede la manipulación de éstos según los tenga a su alcance. La programación modular con la que se llevó a cabo el software, incluye una impresión de reportes en pantalla y vía impresora si se desea.

El software desarrollado se encuentra disponible en forma gratuita a la comunidad científica previa solicitud al autor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de FOMIX Coahuila clave COAH-2006-C05-61261 y del Instituto Tecnológico de Torreón.

LITERATURA CITADA

- BAILLE, A. 1999. Principles and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. *Cahiers Options Méditerranéennes* 31: 177-187.
- CORONA-SAENZ, T.; ALMAGUER-VARGAS, G.; MALDONADO-TORRES, R. 2000. Sistema computarizado experto en diagnóstico nutrimental en naranjo. *TERRA* 18(2): 173-178.
- JUÁREZ-HERNÁNDEZ, M. J.; BACA-CASTILLO, G. A.; ACEVES-NAVARRO, L.A.; SÁNCHEZ-GARCÍA, P.; TIRADO-TORRES, J. L.; SAHAGÚN-CASTELLANOS, J.; COLINAS-LEÓN, M. T. 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Revista Interciencia* 31(4): 246-253.
- PRECIADO-RANGEL P.; FAVELA-CHÁVEZ, E.; BENAVIDES-MENDOZA, A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 85 p.
- PRESSMAN, R. S. 1998. El proceso, pp. 17-36. *In: Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico.* OJEDA-MARTÍN, R.; SÁNCHEZ-VILLORIA, J.; YAGUE-GALAU, V.; ZURDO-CHÁVEZ, J.; JOYANES-AGUILAR, L. (eds). McGraw-Hill. D. F., México.
- SONNEVELD, C.; VOOGT, W.; SPAANS, L. 1999. A universal algorithm for calculation of nutrient solutions. *Acta Hort. (ISHS)* 481: 331-340.
- STEINER, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15(2): 134-154.