

NUTRICIÓN VEGETAL: CARBÓNICA, HÍDRICA Y MINERAL[©]

Mariela Rodríguez

Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

mrodriguez@unal.edu.co

Víctor J. Flórez R.

Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

vjflorez@unal.edu.co

Ricardo Parra

Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

ricarpar@tutopia.com

1 Nutrición Carbónica

El enriquecimiento con CO₂ es una práctica común en los países de clima templado durante la época de invierno. Como esta época es más oscura y fría, para minimizar los costos de la calefacción se hace una pobre ventilación. De esta forma, la infiltración de aire en el invernadero es muy baja y, en consecuencia, el aire no se renueva y la concentración de CO₂ puede caer por debajo de los 300 ppm, parámetro mínimo recomendable. Sin embargo, aún en verano, los cultivadores han ensayado adicionar CO₂ a nivel del suelo en cultivos de dosel denso como tomate y cohombro (17).

Tanto la difusión de vapor de agua hacia el exterior de la hoja como la de CO₂ hacia el interior de la misma se ven afectadas por la resistencia de la capa límite o capa estacionaria: capa límite de aire relativamente en calma, casi saturado de vapor de agua, que cubre la superficie foliar. La resistencia de la capa límite es proporcional al grosor de la capa de aire quieto en contacto con la superficie foliar. El grosor de esta capa se ve afectado por la velocidad del viento y por el tamaño de la hoja, disminuyendo con el aumento de la velocidad del viento y con el tamaño de la hoja. La concentración de CO₂ en esta zona es intermedia entre la concentración externa del aire no atrapado por la hoja y la interna de la misma (2).

Entre las fuentes de CO₂ se citan los materiales orgánicos (compost), el estiércol, el gas natural (propano), el CO₂ líquido, y los gases provenientes de la combustión en los sistemas de calefacción. Entre los factores a tener en cuenta para la efectividad de la aplicación, se considera el tipo de

cultivo, el estadio de desarrollo de la planta, la intensidad de la luz, la temperatura, y la condición fisiológica del cultivo, afectada con algún tipo de estrés (sequía, pérdida de raíces, cierre de estomas) (17).

Lo que más se utiliza para alcanzar las concentraciones deseadas de 1000 a 1500 ppm es gas líquido carbónico bajo presión, que se gasifica al introducirse al invernadero. Para su distribución se usa un circuito de tuberías, lo que lo hace un sistema costoso, además de que se requiere un espacio de almacenamiento (13).

Una vez el CO₂ aplicado, ya sea a través de quemadores o de inyección líquida, éste se debe distribuir haciendo circular el aire, mediante un sistema de ventilación. También, se debe considerar la tasa de renovación de aire del invernadero. De tal forma que para una renovación de aire por hora, parámetro para un invernadero bien sellado, se debe aplicar de 0,3 a 0,4 kg de CO₂, con la finalidad de mantener una concentración de 1000 a 1500 ppm de CO₂ dentro del invernadero. De forma general, un cultivo consume entre 0,12 y 0,14 kg de CO₂/100 m²·h⁻¹, por lo que sería necesario inyectar entre 0,5 y 0,6 kg de CO₂/100m²·h⁻¹. El CO₂ se debe aplicar desde una hora antes del amanecer hasta una hora después del atardecer. Para el caso de invernaderos ventilados tener como tope que la ventilación no pase del 20% del área bajo cubierta (17).

Los cultivos de crisantemo, clavel, rosa, boca de dragón, lechuga, tomate y cohombro responden al enriquecimiento con CO₂ (13). Entre los resultados de ensayos, se reporta que el efecto de la aplicación de 1000 ppm de CO₂, en comparación con la condición ambiente (300 ppm), en plántulas de tomate, es mucho mayor cuando la planta está en estadio de rápido desarrollo vegetativo (17). En plantas madres de pompón se cosecharon 11,8 esquejes/planta con adición de CO₂, en comparación con 7 esquejes/planta en la condición ambiente de CO₂ (17).

Una vez optimizados los demás factores del desarrollo de las plantas se aplica CO₂, si los gastos de la dosificación recomendada no son muy altos. La aplicación de CO₂ en *Alstroemeria* sp. aumentaría la productividad en aproximadamente 10%. En concentraciones entre 600 y 900 ppm, las variedades Barbara y Helios responden mejor a una concentración de 600 ppm; mientras que, las variedades Tiara, Mona Lisa y Fiona presentaron mejor productividad en concentración de 900 ppm de CO₂. También se verificó que las aplicaciones de CO₂ en *Alstroemeria* sp. tienen incidencia favorable en parámetros de calidad. En la actualidad, disponiendo de invernaderos climatizados, se podría alcanzar la concentración de 900 a 1000 ppm de CO₂. Para lo cual, es necesaria la combustión de 2,5 a 3 m³·h⁻¹ de gas natural para 1.000 m² de invernadero (18).

La experiencia y observaciones personales de Holley y Baker (8) los llevaron a concluir que la viabilidad del enriquecimiento del ambiente con CO₂ depende de la temperatura y de la radiación solar. En las regiones del mundo donde las temperaturas del invierno son bajas, acompañadas de una razonable cantidad de brillo solar, el uso del CO₂ ha sido viable.

Las mediciones de CO₂ fueron agrupadas de acuerdo con la incidencia de energía solar bajo condiciones de invernadero cerrado. En los niveles más bajos de luz (121 a 140 cal·día⁻¹), lo que correspondería a los inviernos más oscuros en Colorado, la lectura promedio de CO₂ en el invernadero disminuyó por debajo de los 250 ppm, antes de las 11:00 am. Empezó a aumentar por encima de 250 ppm alrededor de las 2:30 pm. Los promedios de lecturas por debajo de 235 ppm fueron escasos en función del bajo nivel de luz, que limita la asimilación de CO₂. Cuando la incidencia de luz aumentó a 181-220 cal·día⁻¹ el nivel de CO₂ cayó a valores inferiores a 250 ppm, alrededor de las 9:30 a.m.; Alcanzando el punto más bajo de 180 ppm al medio día y aumentando a 250 ppm cerca de las 3:30 p.m. (8).

Cuando se comparó la respuesta varietal del clavel al enriquecimiento de la atmósfera con CO₂, en general, se pudo establecer que la planta responde al tratamiento, observándose diferencias en la

respuesta varietal. El mayor beneficio se obtuvo con una concentración promedio de 600 ppm. Se verificó un pequeño incremento en productividad y una apreciable mejoría en los grados de calidad en épocas específicas del año. Además, los autores asumen que es seguro aplicar en claveles concentraciones de 1.200 a 2.000 ppm de CO₂, sin temor de daños. También, los autores reportaron aumentos del 20% en la producción del mejor grado de calidad y del 9 % en la productividad de clavel, cuando se mantuvo como mínimo la concentración de 600 ppm de CO₂ entre septiembre y marzo (8).

2 Nutrición Hídrica

El agua es esencial para los seres vivos, razón por la que es estudiada en fisiología. Constituye únicamente el 0,00023% de la masa total de la tierra, con un cubrimiento del 72% de la superficie terrestre. De los cuales, el 96,5% se encuentra en los océanos y el 2,5% se encuentra como agua dulce (12, 15, 5).

2.1 Propiedades generales del agua

La molécula de agua está compuesta por dos isótopos de hidrogeno y uno de oxígeno, formando un diámetro aproximado de 2,8 Å. Los átomos de hidrogeno forman un ángulo de 105° con referencia al núcleo de oxígeno y la distancia aproximada entre el oxígeno y el hidrogeno es de 0,96 Å. La unión de los átomos de hidrogeno entre moléculas de agua, absorbe longitudes de onda de alrededor de 3 micras (infrarrojo) y de 10 a 30 micras (radiación térmica), lo que es importante en los procesos de evaporación y transpiración. La molécula de agua es tetraédrica y en cada esquina se encuentra un centro de carga parcialmente positivo o negativo, los cuales actúan con los centros de carga de signo contrario de otras moléculas de agua por comportarse como una molécula polar, formando así grandes redes de moléculas de agua que están unidas por puentes de hidrogeno (12, 15).

El agua líquida es un disolvente para sales inorgánicas, azúcares, aniones y constituye un medio donde se desarrollan las reacciones bioquímicas. Dentro de las propiedades más importantes del agua líquida está su constante de disociación que se mantiene en 10⁻¹⁴ M. También, su densidad alcanza la máxima expresión a 4 °C de temperatura y a una presión estándar, un valor de 1 g·m⁻³.

La condición de ser casi incompresible del agua, la lleva a tener valores de 4,6·10⁻¹¹ cm³·ergio⁻¹ a una temperatura de 20 °C (2, 12).

El calor de fusión para el agua líquida se cifra en 80 cal·g⁻¹ a 0 °C. Se necesita 1 cal·g⁻¹ para pasar de 14,4 a 15,5 °C. Sus calores de vaporización a temperaturas de 0, 25 y 100 °C, son 596, 583 y 540 cal·g⁻¹ respectivamente. Mientras, que su punto de ebullición al nivel del mar se presenta cuando hierve a una temperatura de 100 °C (12,15).

Otra de las propiedades importantes del agua líquida es la presión de vapor. Esta varía directamente con la temperatura y con el contenido de humedad del aire, ya que, se presenta cuando los líquidos se evaporan porque las moléculas se escapan de su superficie, así, a 20 °C el agua líquida tiene una presión de vapor de 0,0238 kg·cm⁻². Su viscosidad es de vital importancia por que es la propiedad que ofrece resistencia a las tensiones superficiales. Varía de acuerdo con la temperatura, por ejemplo de 5 a 25 °C, disminuye de 1,516 a 0,872 kg·seg²·m⁻¹. La atracción capilar se origina por la tensión superficial y por la adhesión entre líquido y sólido a la cohesión del líquido. Para esto, es importante tener en cuenta la energía que se opone a la expansión por medio de las fuerzas cohesivas (puentes de hidrogeno). Siendo ésta tensión superficial superior a la de cualquier otro líquido (16, 12).

Su constante dieléctrica se mantiene en 80,4 a una temperatura de 20 °C y 1 atmósfera de presión, mientras que, a 25 °C llega hasta 78,5. Su conductividad térmica aumenta con el incremento de la temperatura y su conductividad eléctrica está dada en función de las sales presentes en solución a 25 °C y ésta se expresa en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (12).

El potencial hídrico es una propiedad importante en los sistemas suelo-planta-aire y está definido como el potencial químico del agua en un sistema o parte de un sistema, expresado en unidades de presión, que, consiste en el trabajo de una unidad de masa de agua ligada al suelo, o a los tejidos de una planta, para llevarla de este estado de unión a un estado de referencia, que corresponde a la del agua pura a la misma temperatura y presión atmosférica (2, 12, 15).

3 Nutrición Mineral

En general, la masa fresca de la mayoría de las plantas herbáceas está constituida por un 90% de agua y un 10% de masa seca. Del total de la masa seca, el 90% está constituido por carbono, hidrogeno y oxígeno y solo el 10% corresponde a los nutrientes minerales (14, 11).

Las plantas requieren de los nutrientes minerales para realizar sus procesos metabólicos y completar su ciclo de vida. Éstas pueden tomar los nutrientes del suelo o a través de los sustratos utilizados en hidroponía. Actualmente, hay 17 elementos aceptados como esenciales para las plantas; entre los que se incluye el carbono, el hidrogeno y el oxígeno y los 14 restantes, denominados macroelementos primarios, macroelementos secundarios y micronutrientes. Los macroelementos primarios son el nitrógeno, el fósforo y el potasio; los macroelementos secundarios son el magnesio, el calcio, el azufre, y los micronutrientes son el boro, el cloro, el hierro, el manganeso, el cobre, el molibdeno, el níquel y el zinc (15, 10).

Además de los elementos esenciales, existen algunos elementos importantes para la nutrición de algunas plantas, bajo condiciones determinadas. A éstos se les denomina elementos beneficiosos, porque son esenciales para algunos tipos de plantas o estimulan el crecimiento de algunas especies. Este es el caso del silicio, esencial para algunas gramíneas y ciperáceas; del sodio, importante para las plantas CAM y C_4 ; y de otros menos estudiados como el cobalto, el selenio, el aluminio, el rubidio, el estroncio, el bario, el titanio y el vanadio (10, 1).

La técnica de fertirriego cobra especial importancia en los cultivos bajo invernadero, porque permite fraccionar los recursos hídricos y fertilizantes según las necesidades diarias de la planta. El suministro de los nutrientes utilizando esta técnica debe tener en cuenta los siguientes aspectos (9, 1):

1. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo o sustrato: Los sustratos con escasa o nula CIC no almacenan nutrientes, por lo tanto, la planta los absorbe directamente de la solución nutritiva. Los suelos o los sustratos con cierta CIC retienen nutrientes que son absorbidos en forma catiónica; mientras que, los nutrientes en forma aniónica, como es el caso del nitrógeno aplicado en forma nítrica, tiene un alto riesgo de lixiviación y puede perderse en grandes porcentajes.
2. Especie y variedad de la planta: Plantas de diferentes especies o incluso de diferente variedad, pueden tener una nutrición mineral diferente bajo las mismas condiciones ecofisiológicas y de fertilización.
3. Estadio fenológico: Las plantas jóvenes absorben a mayor velocidad los nutrientes y a medida que avanzan en su desarrollo fenológico esta velocidad disminuye.

4. Factores climáticos: Tanto la temperatura como la humedad y la luz inciden directamente sobre la absorción de los nutrientes, por esta razón es importante conocer los límites fisiológicos de la planta cultivada con respecto a estos factores.
5. Interacciones iónicas, como sinergismo y antagonismo entre los diferentes elementos: Sinergismo, cuando el aumento en la concentración de un elemento potencia la absorción de otro, como en el caso del fósforo y el molibdeno (1). Antagonismo, cuando el aumento en la concentración de un elemento dificulta la absorción de otro, como en el caso del potasio y del calcio (1).
6. Tolerancia a la salinidad: Este aspecto es importante porque la salinidad afecta la toma de agua por parte de la planta, lo cual implica un gasto energético mayor para satisfacer sus requerimientos hídricos, afectando el rendimiento del cultivo (3, 1).
7. pH: El pH afecta la solubilidad y la carga de los iones. Así, a pH básico el cobre, el manganeso y el zinc se precipitan y no son disponibles para las plantas y, a pHs muy bajos, el fósforo es inmovilizado por el aluminio (1).

3.1 Mecanismos de absorción mineral

El fertirriego consiste en la aplicación simultánea del agua de riego y de los fertilizantes por medio de sistemas de inyección, generalmente de manera localizada y con alta frecuencia de acuerdo a la demanda de las plantas. Es importante tener en cuenta los mecanismos por los cuales los nutrientes son absorbidos por la planta para responder a esta demanda. Estos mecanismos son (2, 1, 15, 7):

- ✓ Interceptación por raíces: Las raíces permanecen en contacto con la solución del suelo, encontrando e interceptando algunos de los elementos presentes, siendo ésta contribución muy pequeña en relación con los otros mecanismos de absorción. Esta interceptación se puede incrementar aumentando la densidad de raíces jóvenes, como ocurre en los cultivos en sustrato.
- ✓ Flujo de masas: Es el movimiento del agua y de los solutos de manera conjunta y en una dirección hasta llegar a la superficie de las raíces como respuesta a un diferencial en el potencial hídrico. La transpiración es el principal fenómeno que afecta este movimiento de agua con elementos disueltos en ella.
- ✓ Difusión: Es el movimiento de las moléculas de agua desde un punto de elevada, a otro de baja concentración, hasta alcanzar un equilibrio debido a la actividad del potencial químico de las moléculas o iones.

Es importante tener en cuenta que el movimiento del agua en la planta está regido por gradientes de potencial hídrico (2). Por ejemplo, el mecanismo para la absorción de iones por difusión es minimizado en los cultivos en sustrato, mientras que el mecanismo de flujo de masas toma bastante importancia. En plantas de rosa cultivadas en sustrato se mantuvo el rendimiento de flores de buena calidad con el continuo movimiento y mezclado de la solución en un sistema hidropónico, regando constantemente las raíces, lo cuál, disminuyó el gradiente entre la raíz y el extracto de saturación (4).

3.2 La solución del suelo

Tradicionalmente la solución del suelo se obtiene a partir de lo que conocemos como extracto de saturación. Esta “solución del suelo”, está compuesta por la fase líquida (solvente) y los solutos que ocupan los espacios libres del suelo o del sustrato. La porosidad depende directamente de su composición granulométrica. También, el extracto de saturación se define como una solución que

casi posee equilibrio de electrolitos y que ocurre en condiciones de suelos o sustratos no saturados por agua y es de gran importancia en la nutrición de las plantas (6, 7).

La solución del suelo contiene cationes, aniones, moléculas inorgánicas y orgánicas u órgano metálicas, que varían de acuerdo con las condiciones del ambiente y de los materiales sólidos que forman el sustrato. Hacen parte de su composición las sales solubles, las sales absorbidas, los compuestos precipitados y los iones cambiables (6).

En general, la concentración total de elementos en la solución del suelo es pequeña. Los principales aniones en la solución son aquellos que no son adsorbidos y los poco adsorbidos. Las proporciones en que participan los cationes para equilibrar a los aniones antes indicados dependen de la carga de los cationes, de la proporción en que contribuyen con los cationes cambiables, del tamaño de los iones en su forma hidratada, y de las propiedades del material cambiador de cationes (6).

En el suelo son de gran importancia los factores biológicos, las propiedades físicas y químicas, la presencia y solubilidad de sus componentes inorgánicos y orgánicos, su temperatura y la presión de los diferentes gases en la atmósfera del suelo. Estos factores influyen en las concentraciones de los componentes de la solución del suelo. Como resultado, la concentración de la solución del suelo es muy variable. También se debe tener en cuenta el contenido de humedad del suelo, así como, la concentración y la calidad de las sales en la solución, factores que varían continuamente en el perfil del suelo a través del tiempo (6, 12).

No todos los cultivos responden igual a una misma condición de humedad del suelo o del sustrato para mantener la demanda evapotranspirativa. La evaporación juega un papel importante ya que influye en la reducción de la humedad del suelo y esto hace que la concentración de sales aumente, especialmente en la capa superficial. Con el riego se busca aumentar el contenido de humedad y redistribuir las sales en el perfil del suelo (12).

La absorción de los elementos nutritivos se efectúa por medio de los pelos radicales. En condiciones normales pueden alcanzar una cifra de 200-300 por mm² de raíz, lo que significa una gran superficie de captación de nutrientes. El aprovechamiento de estos nutrientes por las plantas depende de la capacidad de almacenamiento del suelo o del sustrato, de un alto potencial hídrico, del crecimiento y actividad de las raíces, de la aireación y la temperatura apropiada, de la salinidad y del adecuado suministro de agua (1, 12).

Para conocer la composición del extracto de saturación o solución del suelo se debe tener en cuenta que éste está en equilibrio dinámico con la fase sólida del suelo o del sustrato y que es difícil extraerlo, sin que sufra cambios de importancia. Actualmente, se extrae usando tubos de porcelana porosa cerrados en la punta, los que conectados a un tubo de succión variable permiten una extracción rápida (6).

4 Bibliografía

1. Alarcón A. 2000. Tecnología para cultivos de alto rendimiento (Alarcón A., Ed.). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 459p.
2. Azcón-Bieto J. y M. Talón. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Mc Graw Hill. Madrid, 522p.
3. Barceló C., J., G. Nicolás R., B. Sabater G. y R. Sánchez T. 1995. Nutrición mineral. En: Fisiología vegetal. 7 ed. Ediciones Pirámide S.A., Madrid., p. 151-167.
4. Cabrera R., Evans R. y J. Paul. 1995. Cyclic nitrogen uptake by greenhouse roses. *Scientia Horticulturae* (63) p 57-66.
5. Chow V. T., Maidment D. R. y L. W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. Bogotá, 584 p.

6. Fassbender H. y E. Bornemisza. 1994. Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José de Costa Rica, 420 p.
7. Foth H. D. and B. G. Ellis. 1997. Soil Fertility. Lewis Publishers, Michigan, 290 p.
8. Holley, W. D. y Baker, R. 1991. Carnation production II. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, p.p. 59-66.
9. López-Gálvez y Segovia. 1996. La fertilización. En: Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos. López-Gálvez, J y J. M. Naredo (eds.). Fundación Argentaria-Visor Distribuciones, Madrid, p. 95-110.
10. Marschner, H. 1998. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, San Diego, 889p.
11. Medina, A. 1999. Manejo de la nutrición en el rosal después de la cosecha de San Valentín. En: Mantenimiento de plantas de rosa, curso de actualización profesional. Lee, R. (ed.). Centro de Investigaciones y asesorías agroindustriales Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Chía, p. 31-48.
12. Narro E. 1994. Física de Suelos con enfoque agrícola. Trillas, México, 195 p.
13. Newman, S. 1999. Efectos del clima en la fisiología de la floración. En: Clima fisiología y producción de cultivos bajo invernadero. Rebecca L. (editora). Cuadernos del Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales - CIAA. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, p. 27 a 33.
14. Resh, H., 1992. Nutrición de las plantas. En: Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, p 23-48.
15. Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 1992. Plant Physiology. (4th. Ed). Wadsworth Publishing, Belmont, 662p.
16. Streeter V. L. 1971. Mecánica de los Fluidos. Mc Graw Hill. México, 747 p.
17. Tsujita, J. 1999. Manejo de factores del control de clima en la producción de flores. Ejemplos de Canadá. En: Clima fisiología y producción de cultivos bajo invernadero. Rebecca L. (ed). Cuadernos del Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales - CIAA. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, p. 19-26.
18. Van Staaveren (2003) www.alstroemeria.com

