



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Comportamiento de micronutrientes en un sistema de producción de clavel en sustrato con recirculación de drenajes

José Miguel Mesa Fernández

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá D.C.
2014**

Comportamiento de micronutrientes en un sistema de producción de clavel en sustrato con recirculación de drenajes

José Miguel Mesa Fernández

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al Título de
Magíster en Ciencias Agrarias.

Director
Víctor J. Flórez R.

Codirectora
Martha Cecilia Henao T.

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá D.C.
2014**

A Mi madre, que desde la eternidad ha sido mi
ejemplo, mi luz, mi ángel guardián.

 Mi padre y mis hermanos por su eterna
 paciencia y apoyo incondicional.

A todos mis amigos, especialmente a Deissy,
quien me impulsó a tomar este reto.

A ese Dios maravilloso que me permite hoy
estar escribiendo estas palabras.

Agradecimientos

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos al grupo de trabajo “Producción más limpia de rosa y clavel en sistemas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá” y a todas las entidades que lo financiaron: Colciencias, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y Ceniflores. A las compañías Suata Plants S.A., Productos Químicos Andinos S.A. y a Brenntag Colombia S.A. por el suministro de materiales necesarios para el montaje y ejecución de la investigación.

A los profesores Víctor J. Flórez y Martha C. Henao quienes apoyaron y dirigieron todo el trabajo de investigación. Agradece de forma muy especial al personal docente y administrativo de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, quienes contribuyeron al desarrollo exitoso de este trabajo de grado y de maestría.

Resumen

La floricultura en Colombia se desarrolla principalmente en la Sabana de Bogotá, allí la producción intensiva de clavel en suelo se ve limitada por la alta incidencia de *Fusarium oxysporum* f.sp. dianthi, por lo que se ha optado por su cultivo en sustrato. Este sistema genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y fertilizantes vertidos al medio ambiente, sin embargo, los sistemas con recirculación de lixiviados se presentan como una alternativa a los problemas de contaminación y de pérdida de nutrientes que se genera en los sistemas abiertos. El objetivo del estudio fue caracterizar el comportamiento de Fe, Mn, Zn, Cu, y B en un sistema de producción de clavel estándar cv. Delphi, en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con 0, 50 y 100% de recirculación de drenajes. El ensayo se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero en el Centro de Biotecnología Agropecuaria del SENA, en Mosquera (Cundinamarca). Esquejes de clavel estándar cv. Delphi fueron sembrados en los sustratos 100% cascarilla de arroz (100CAQ), 65% cascarilla de arroz - 35% fibra de coco (65CAQ) y 35% cascarilla de arroz - 65 % fibra de coco (35CAQ), sometidos a 0, 50 y 100% de recirculación de los drenajes. Se realizaron análisis de Fe, Mn, Zn, Cu, y B en lixiviados, sustratos y en el tejido vegetal en los estadios fenológicos “primer pico”, “valle”, “transición vegetativo-reproductivo”, “desbotone” y “segundo pico” (29, 37, 42, 48 y 54 semanas después de siembra respectivamente). Se encontró que no hay una acumulación significativa de microelementos en los lixiviados colectados, en la mayoría de los casos se presentan niveles inferiores a los de la solución nutriente aplicada y tan solo Cu esta sobre el límite considerado máximo para aguas de riego. Se observó que el mayor porcentaje de recirculación no fue un factor determinante en la concentración de todos los microelementos en el lixiviado. Por otro lado, el pH del lixiviado si interviene en las mayores concentraciones de elementos como Mn y Fe en el lixiviado. Con respecto a los sustratos, estos no están influenciados por el porcentaje de recirculación empleada, sino que sus mayores o menores concentraciones de microelementos son determinadas por sus características propias. En cuanto a las concentraciones de los elementos en tejido, estas siempre fueron aptas para el adecuado desarrollo del cultivo, dado que no hubo diferencias estadísticas entre las concentraciones en el tejido como resultado de los tratamientos empleados.

Palabras Clave: Sistemas de cultivo sin suelo, sustratos orgánicos, comportamiento de nutrientes, sistemas de recirculación, floricultura.

Abstract

Floriculture activity in Colombia is mainly developed in Bogotá plateau, there intensive carnation production in soil is limited by the high incidence of *Fusarium oxysporum* f.sp. dianthi, so the soilless crop production has been adopted. The aim of this study was the Fe, Mn, Zn, Cu, y B behavior in a carnation production system grown on substrates based on burned rice husk and coconut fiber, with drainage recycling. The test was carried out under greenhouse conditions in the Agricultural Biotechnology Center SENA, located in Mosquera, (Cundinamarca). Standard carnation cuttings cv. Delphi were grown in substrates 100% rice husk (100BRH), 65% rice husk - 35% coconut fiber (65BRH) and 35% rice husk - 65% coconut fiber (35BRH), subjected to 0, 50 and 100% drain recirculation. Fe, Mn, Zn, Cu, y B analysis were performed on drainage, vegetal tissue and substrates in "first peak", "valley", "vegetative-reproductive transition", "disbudding" and "second peak" phenological stages (29, 37, 42, 48 and 54 weeks after planting respectively). Results show that there is no significant accumulation of microelements in the leachate collected; in most cases it was lower than the applied nutrient solution level and only Cu is over the maximum limit considered for irrigation water. It was observed that the highest percentage of recirculation was not a determining factor in the concentration of all trace elements in the leachate. On the other hand, the pH of leachate is involved in higher concentrations of elements such as Mn and Fe in the leachate. With respect to the substrates, these are not influenced by the percentage of recirculation used, but the higher or lower concentrations of trace elements are determined by their own characteristics. With respect to the concentrations of elements in tissue, these were always suitable for the proper development of the crop, since there were no statistical differences between the concentrations in the tissue as a result of the treatments used.

Keywords: Systems soilless, organic substrates, behavior nutrients, recirculation systems, floriculture.

Contenido

	Pág.
Resumen y Abstract.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de anexos	XVII
Objetivos	4
1. Marco teórico.....	5
1.1 Generalidades de los sustratos	5
1.1.1 Cascarilla de arroz quemada	7
1.1.2 Fibra de Coco	8
1.2 Propiedades de los sustratos	9
1.2.1 Propiedades físicas	9
1.2.2 Propiedades químicas	10
1.2.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	10
1.2.4 Sales solubles	11
1.2.5 pH.....	11
1.3 El agua en cultivos sin suelo	12
1.3.1 El agua de riego.....	13
1.3.2 Salinidad.....	13
1.3.3 Potencial de Hidrogeniones (pH)	14
1.3.4 Alcalinidad	14
1.3.5 Dureza.....	15
1.3.6 Iones tóxicos.....	15
1.3.7 Agua y nutrientes en sistemas controlados.....	16
1.4 Principales características de los elementos analizados	17
1.4.1 Hierro.....	17
1.4.2 Manganeseo.....	18
1.4.3 Cobre.....	20
1.4.4 Zinc.....	21
1.4.5 Boro.....	22
2. Materiales y métodos	25
2.1 Ubicación.....	25
2.2 Siembra y establecimiento	25
2.3 Actividades de producción	26

2.4 Muestras.....	27
2.5 Aguas	28
2.6 Sustratos	29
2.7 Diseño experimental.....	29
3. Resultados y discusión	31
3.1 Dinámica de las variables analizadas en los lixiviados	31
3.1.1 Efecto de los tratamientos (sustratos y recirculación) sobre la concentración de microelementos en los lixiviados.....	31
3.1.2 Efecto de la recirculación en la composición de los lixiviados	33
3.1.3 Efecto del tipo de sustrato en la composición de los lixiviados	34
3.1.4 pH de los lixiviados	35
3.1.5. Conductividad eléctrica de los lixiviados	38
3.1.6 Microelementos en los lixiviados	40
3.2 Dinámica de las variables analizadas en los sustratos	49
3.2.1 Efecto de los tratamientos (sustratos y recirculación) en el contenido de los microelementos en los sustratos.....	49
3.2.2 Efecto de la recirculación en la composición de los sustratos	50
3.2.3 Efecto del tipo de sustrato en la composición de los sustratos.....	50
3.2.4 pH en los sustratos	52
3.2.5 Conductividad eléctrica de los sustratos	54
3.2.6 Capacidad de intercambio catiónico.....	56
3.2.7 Micronutrientes en los sustratos	59
3.3 Dinámica de las variables analizadas en el tejido vegetal.....	66
3.3.1 Efecto de los tratamientos en la concentración de microelementos en el tejido vegetal	66
3.3.2 Composición del tejido vegetal.....	68
3.4 Productividad y calidad.....	71
3.4.1 Productividad	71
3.4.2. Calidad.....	72
4. Conclusiones y recomendaciones	75
4.1 Conclusiones	75
4.2 Recomendaciones.....	76
Anexos:.....	77
Bibliografía	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Variación de la concentración de manganeso en solución en función del pH de los lixiviados (N =132), en un cultivo de clavel estándar cv Delphi crecido en tres sustratos (35, 65 y 100 CAQ) y en con tres porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%R).	36
Figura 2. Variación del pH en los lixiviados a través de los cinco estadios fenológicos evaluados para el cultivo de clavel. Cada punto en cada curva es el promedio de las tres repeticiones. Por cada tratamiento de recirculación se presentan las tres curvas correspondientes a los tipos de sustrato (sin diferenciar en la gráfica).	37
Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica en los lixiviados correspondientes al tratamiento 35CAQ (a: 0%; b: 50%; c: 100% de recirculación). Cada línea representa un bloque o repetición.	39
Figura 4. Índice de crecimiento o disminución de los contenidos de boro, cobre, hierro, y Zinc en 0, 50 y 100 % recirculación, respecto a la solución inicial utilizada. Manganeso no fue incluido dado que no fue aplicado en la solución fertirrigante.	40
Figura 5. Variación del contenido de cobre en el lixiviado en función de la recirculación utilizada en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi cultivadas en el sustrato 100CAQ	42
Figura 6. Variación del contenido de boro en los lixiviados en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R.	43
Figura 7. Variación del contenido de hierro en los lixiviados en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100%R.	44
Figura 8. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de hierro en función del pH en los lixiviados (N = 45), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 35CAQ (A) y 65CAQ (B).	45
Figura 9. Comportamiento del contenido de manganeso en el lixiviado en función de los sustratos evaluados (35 CAQ, 65CAQ y 100CAQ), para los tres porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%), en un cultivo de clavel estándar cv. Delphi.	46
Figura 10. Variación del contenido de zinc en los lixiviados en función del porcentaje de recirculación utilizado en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100CAQ...	47

Figura 11. Modelo de regresión lineal simple entre las concentraciones de zinc y cobre (A) y entre hierro y manganeso (B) en los lixiviados (N = 135), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 35CAQ, 65CAQ y 100CAQ con 0, 50 y 100%R.	49
Figura 12. Variación de la CE en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R	55
Figura 13. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de boro y la CIC en los sustratos (N = 45), para clavel estándar cv Delphi cultivado en 50 (A) y 100%R (B).	57
Figura 14. Variación de la CIC en las mezclas de sustratos empleados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi cultivados en 35CAQ, 65 CAQ Y 100CAQ con 0, 50 Y 100%R	58
Figura 15. Comportamiento del contenido de hierro en el sustrato en función de los sustratos evaluados (35CAQ, 65CAQ y 100CAQ), para los tratamientos con 50 y 100%R, en un cultivo de clavel estándar cv. Delphi.	61
Figura 16. Variación del contenido de cobre en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 50%R	62
Figura 17. Variación del contenido de boro en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100%R	65
Figura 18. Modelo de regresión lineal simple de la concentración de cobre y de hierro en los sustratos 35, 65 y 100 CAQ en un cultivo de clavel estándar cv Delphi crecido en tres porcentajes de recirculación 0, 50 y 100%R. (N = 135).	65
Figura 19. Variación del contenido de manganeso en el tejido en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R	70
Figura 20. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de cobre en el tejido y el pH en los lixiviados (N = 45), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 65CAQ (A) y 100CAQ (B) con 0, 50 y 100R.	70
Figura 21. Cantidades y calidades de tallos por metro cuadrado-cama de clavel Delphi cultivado en tres sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco con 0, 50 y 100% de recirculación de drenajes, dados recolectados en el segundo pico de cosecha.	71
Figura 22. Productividad a segundo pico de producción en función de la recirculación (A) y en función de los sustratos (B); en clavel variedad Delphi cultivado en tres sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco con 0, 50 y 100 % de recirculación	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz tostada.	8
Tabla 2. Propiedades químicas de la fibra de coco	
Tabla 3. Descripción de la cantidad en mg.L^{-1} de elemento utilizado para la nutrición de clavel estándar cv. Delphi, durante el transcurso del ensayo.	9
Tabla 4. Propiedades químicas analizadas en los lixiviados, sustratos y tejido vegetal (planta entera de clavel), y relación de los métodos analíticos empleados.	26
Tabla 5. Propiedades químicas del agua de reservorio empleada durante el ensayo de campo.	28
Tabla 6. Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo de campo. 33	28
Tabla 7. Tratamientos a evaluar en clavel estándar var. Delphi cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes	29
Tabla 8. ANAVA de las variables determinadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación; en evaluación realizada en diferentes estadios fenológicos.	32
Tabla 9. Estadística descriptiva de las propiedades químicas analizadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.	35
Tabla 10. Promedios de las propiedades químicas analizadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.	35
Tabla 11. ANAVA de las variables determinadas en los sustratos de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación; en evaluación realizada en diferentes estadios fenológicos.	51
Tabla 12. Estadística descriptiva de las propiedades químicas analizadas en los sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco.	52
Tabla 13. Promedios de las propiedades químicas analizadas en los sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco.	53
Tabla 14. ANAVA de las variables determinadas en el tejido vegetal (planta entera) de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación y evaluados en cinco estadios fenológicos.	67

Tabla 15. Estadística descriptiva de las concentraciones de los microelementos determinados en los tejidos de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.	68
Tabla 16. Promedio de las concentraciones de los microelementos determinados en el tejido de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.	69
Tabla 17. Análisis de varianza de los parámetros de calidad de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación, en evaluación realizada en segundo pico de cosecha	72

Lista de anexos

	Pág.
Anexo 1. Diseño experimental de bloques completos al azar usado en el módulo de invernadero destinado al cultivo de clavel, donde 0, 50 y 100% de recirculación fueron las parcelas principales y 100CAQ, 65CAQ y 35 CAQ las subparcelas	77
Anexo 2. Variación en el comportamiento de: pH, CE, Fe, Mn, Cu, Zn y B en los lixiviados; CIC, pH, CE, Fe, Mn, Cu, Zn y B en los sustratos; y Fe, Mn, Cu, Zn y B en el tejido vegetal de un cultivo clavel estándar cv Delphi, presentado en función de los porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%R) y los sustratos evaluados (35, 65 y 100CAQ), determinados en distintos estadios fenológicos	79
Anexo 3. Pruebas de Normalidad (Shapiro-Wilk) para concentraciones de elementos en sustratos, lixiviados y tejidos de plantas de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R	100
Anexo 4. Pruebas de Normalidad (Shapiro-Wilk) para grados de calidad de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R	101
Anexo 5. Matriz de correlación para concentraciones de elementos en sustratos, lixiviados y tejidos de plantas de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R	102

Introducción

Para el año 2011 las exportaciones de flores en Colombia alcanzaron los USD \$ 1.050'000.000 con 205.000 toneladas, siendo la principal actividad agrícola de exportación no tradicional para el país. Esta actividad genera alrededor de 180.000 empleos y ocupa 7.509 hectáreas, siendo la sabana de Bogotá (76%) la principal zona de producción seguida de Antioquia con el 19% y la zona centro-Occidente el restante 5%. En la floricultura colombiana el cultivo del clavel ocupa el 21% del área sembrada (Asocolflores, 2014).

Durante los últimos años el sector floricultor Colombiano ha afrontado limitantes en la producción del clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) para exportación, debido principalmente a la alta incidencia del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi*, pero también a la presencia de algunas plagas como nematodos, sinfílidos colémbolos, y a los altos costos en la desinfección de los terrenos afectados.

Como alternativa los floricultores de la sabana de Bogotá implementaron la técnica de cultivos en sustrato, para lo cual se han venido empleando sustratos de naturaleza orgánica como cascarilla de arroz, compost y fibra de coco, entre otras. Estas técnicas de cultivo se realizan a solución perdida, es decir, se desechan cantidades importantes de lixiviados con contenidos de agua y nutrientes, que son vertidos al suelo o a los cuerpos de agua.

Los sustratos y las mezclas de sustratos son materiales que actualmente se están usando para sembrar varios productos agrícolas, especialmente en la agricultura de alto rendimiento, como es el caso de las flores de corte para exportación. El conocimiento logrado recientemente sobre diferentes aspectos relacionados con el cultivo en sustrato permitirá evitar errores que afecten la producción y propiciará el uso extensivo de esta tecnología.

El actual sistema de cultivo de clavel en sustratos genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y del vertimiento de sales fertilizantes al medio ambiente. En este sentido, Parra y Flórez (2006) plantearon para la sabana de Bogotá los sistemas cerrados como una solución a los problemas de contaminación que se genera en los sistemas abiertos, y consisten en la reutilización de los lixiviados por medio de las diferentes técnicas de recirculación de la solución nutritiva, a fin de buscar una disminución en la cantidad de agua y fertilizantes aplicados.

Entre las ventajas e inconvenientes de la reutilización de lixiviados se encuentran: reducción de la contaminación por lixiviados; ahorro de agua entre 15 y 50% dependiendo del cultivo, condiciones climáticas y tipo de recirculación (total o parcial); ahorro de fertilizantes entre el 50 y 80% en abonos nitrogenados; aumento de la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva a medida que se reutiliza, y una posible disminución en la productividad con recirculación (Marfá, 2001).

Respecto a los cultivos establecidos en suelo, el cultivo en sustrato ofrece mejor manejo sobre el desarrollo vegetativo de las plantas, mayor calidad y precocidad en la producción y admite la posibilidad de mecanizar y sistematizar la producción (Durán y Martínez, 2000).

Para Alarcón (2000), los cultivos en sustratos con recirculación en nutrientes están aumentando en el futuro inmediato, no solo por los probados incrementos que supone en cuanto productividad, calidad y precocidad de las cosechas, sino también por el agotamiento, la salinización y la contaminación por patógenos de los suelos de los invernaderos, y de las zonas de producción hortícola en general.

Actualmente los programas de fertilización en flores de corte se realizan con el concepto de concentración, porque no se tienen los conocimientos adecuados acerca de la demanda de la planta por unidad de área y tiempo de desarrollo (Alarcón, 2000). Con el fin de optimizar el manejo en la concentración de la solución nutritiva es importante realizar un diagnóstico basado en el análisis del sustrato, del tejido foliar y del drenaje que permita hacer las correcciones respectivas en el manejo de los fertilizantes empleados incluidos los micronutrientes. En la actualidad no se cuentan con reportes de la dinámica de los nutrientes en cultivos clavel en sistemas recirculados, y los reportes en

otras especies son enfocados a macronutrientes y nutrientes secundarios. En general, estos estudios se han enfocado en resolver otros problemas de investigación.

A pesar de estar presentes en bajas concentraciones, los micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, B, Cl, Mo) tienen la misma importancia que los macronutrientes (N, P, K, S, Ca, Mg) en el crecimiento de las plantas, pudiendo resultar limitantes en el desarrollo de muchos cultivos (Havlin *et al.*, 1999). No obstante, la mayoría de la investigación en nutrición mineral de las plantas está asociada con los macronutrientes.

El suplemento adecuado de micronutrientes incrementa en forma sustancial la productividad del cultivo. Un nivel óptimo de micronutrientes en la planta es esencial para que el nitrógeno y el fósforo aplicados en los fertilizantes sean usados eficientemente por las plantas (Mengel y Kirkby, 2000).

Para satisfacer las necesidades de la planta, los micronutrientes deben encontrarse en concentraciones suficientes y en formas disponibles, en o cerca a la superficie de la raíz. Su suministro está gobernado por factores como la concentración en el tejido vegetal y en la solución del suelo, la química en la superficie de la raíz o en la rizósfera, y las interacciones de un elemento con otro (Fageira *et al.*, 2002).

Se han reportado ampliamente deficiencias y toxicidades de micronutrientes en las plantas, aunque existe mayor información sobre los niveles críticos, por debajo de los cuales se presentan deficiencias, que de los niveles críticos sobre los cuales se presenta toxicidad (Fageria *et al.*, 2002).

En el caso de los cultivos cuya nutrición se garantiza a través del uso de soluciones nutritivas, el manejo adecuado de los micronutrientes es muy importante, ya que estos deben mantenerse en concentraciones extremadamente bajas para asemejar la composición de la solución del suelo y evitar la toxicidad de elementos indeseables en especies sensibles (Parker y Norvell, 1999).

Teniendo en cuenta la trascendencia que están tomando actualmente el uso de sistemas recirculantes, la necesidad de su desarrollo y la importancia de la información base en el uso y el efecto de los micronutrientes en el cultivo de clavel, este proyecto se considera con una investigación pionera en estos dos aspectos de análisis, generando a

partir de medios, condiciones y tecnología locales de producción, información valiosa para la adecuada nutrición en este cultivo.

Los datos analizados en este estudio se obtuvieron de un ensayo llevado a cabo en el marco del macroproyecto genéricamente denominado “Producción más limpia de rosa y clavel en sistemas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá”; cuyo objetivo fue conocer en qué porcentaje es factible mantener un sistema de recirculación sin causar daños a las plantas, con el fin de corregir y aumentar la eficiencia del sistema, optimizando el uso de recursos y haciendo aportes al fortalecimiento de la actividad productora de clavel en la Sabana de Bogotá (Flórez *et al.*, 2006).

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de Fe, Mn, Zn, Cu, y B en un sistema de producción de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) estándar cv. Delphi, en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con 0, 50 y 100% de recirculación de drenajes

Objetivos específicos

- Caracterizar la composición química en los lixiviados de Fe, Mn, Zn, Cu y B, con tres mezclas de sustratos y en diferentes estadios fenológicos.
- Caracterizar la composición química en los sustratos de Fe, Mn, Zn, Cu y B, con tres porcentajes de recirculación y en diferentes estadios fenológicos.
- Caracterizar la composición química en el tejido vegetal de clavel estándar cv. Delphi de Fe, Mn, Zn, Cu y B, en seis estadios fenológicos para las distintas mezclas de sustratos y en tres porcentajes de recirculación.
- Evaluar la productividad y la calidad del clavel estándar cv. Delphi cultivado en tres sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco y sometido a tres porcentajes de recirculación de drenajes.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades de los sustratos

Desde el punto de vista práctico, los cultivos sin suelo suelen clasificarse en cultivos hidropónicos (Cultivos en agua más nutrientes o sobre materiales inertes) y cultivos en sustrato (cultivos sobre material químicamente activo, con capacidad de intercambio catiónico). Los cultivos sin suelo pueden funcionar como sistemas abiertos, a solución a pérdida, no recirculante o como sistemas cerrados, con recirculación de las soluciones nutritivas (FAO, 1990).

Abad *et al.* (2005) definen sustrato como un material sólido distinto del suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla permite el anclaje del sistema radicular y desempeña por tanto un papel de soporte para la planta, y no debería provocar un impacto medioambiental de importancia.

La FAO (2005) considera que un sustrato apto para un cultivo debe acumular y suministrar suficiente agua, para permitir intervalos apropiados entre riegos. Desde el punto de vista de la retención de humedad, es necesario conocer el contenido de aire del sustrato, el agua fácilmente disponible y el agua de reserva. Así mismo, el sustrato debe ser de textura conocida y de estructura estable a lo largo del período de uso. Igualmente, quienes los utilicen deben manejar conceptos técnicos como densidad aparente, densidad real, espacio poroso total y fase sólida (Alarcón, 2000).

No existe el sustrato ideal, cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a plantar y las variables ambientales y de la instalación. Lo que sí existe es un manejo ideal para cada sustrato a emplear (Alarcón, 2000).

La práctica de suministro de agua realizada por las empresas de flores en Colombia se hace en forma empírica y todas las características hidrofísicas de los sustratos, que son necesarias y recomendadas para lograr un manejo apropiado del agua, son subestimadas y se imponen los conocimientos empíricos que han producido hasta la fecha buena rentabilidad para el productor (González *et al.*, 2006).

En Colombia se han realizado estudios sobre propiedades hidrofísicas y químicas de los sustratos actualmente más utilizados. En cuanto a las primeras, Quintero (2009) realizó un estudio enfocado a determinar densidad real, densidad aparente, porosidad total, distribución granulométrica, conductividad hidráulica y retención de humedad en el cultivo de clavel variedad Nelson. También, Botero (2007) estudió los cambios en la composición química de los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ en un cultivo de clavel variedad Nelson sin recirculación. Ambos estudios, realizan aportes importantes en información y logran caracterizar el comportamiento de los sustratos en condiciones de fertirriego en un cultivo de clavel sin recirculación.

Fernández (2006) determinó los niveles foliares de macro y microelementos del clavel estándar cv. Nelson, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ, en un sistema de producción sin recirculación de nutrientes. Encontró niveles foliares excesivos de fósforo, magnesio y calcio en la etapa de *pinch* mientras que, en los sustratos no se encontraron diferencias. También, respecto a hierro, manganeso y boro reporta niveles normales en los distintos sustratos, resultados que permiten observar cambios en la dinámica de los elementos y en su demanda con las etapas fenológicas.

Los contenidos de microelementos en un sistema de recirculación de clavel, en sustratos, lixiviados y su efecto en la planta, no han sido observados. El contenido en cada una de las etapas fenológicas del clavel, la absorción a lo largo del cultivo en distintos sustratos, las propiedades que determinan la calidad del agua como el pH, la conductividad eléctrica (CE) o acumulación excesiva de algunos iones, la cantidad de elementos potencialmente dañinos que son liberados, efectos sinérgicos o antagónicos por el efecto de la recirculación sobre la absorción por la planta, entre otros, necesitan ser analizados y comprendidos bajo los recursos y materiales utilizados y en las condiciones de la Sabana de Bogotá.

1.1.1 Cascarilla de arroz quemada

Este material es un subproducto de la industria molinera que se produce ampliamente en las zonas arroceras y que ofrece buenas propiedades para ser usado como sustrato en sistemas de siembra sin suelo. Es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, por su alto contenido de silicio. Es liviano y su principal costo es el transporte, dado que para los molineros es un desecho. Se presenta como material liviano, de buen drenaje, buena aireación, pero presenta una baja retención de humedad inicial y es difícil conservar la humedad homogéneamente cuando se usa como sustrato único en camas o bancadas. Tiene una buena inercia química inicial, aunque con el paso de los años, dos o más, se va descomponiendo (Calderón y Cevallos, 2001).

La necesidad de utilizarla quemada o tostada, obedece al hecho de aumentar su capacidad de retención hídrica, que pasa de una retención de humedad del 8-10% cuando es cruda a valores alrededor de 10 – 15% cuando esta quemada, mejorando notablemente su humectabilidad (Alarcón, 2006). Usualmente la intensidad del quemado que se pretende varía entre un 50 % y un 100 % según el grado de carbonización, no se debe dejar llegar nunca hasta cenizas (Calderón y Cevallos, 2001).

La cascarilla es un sustrato liviano (densidad aparente entre 0,090 y 0,22 g de masa seca por cm³), tiene alta porosidad y conductividad hidráulica, su pH es neutro, mientras que su conductividad eléctrica y su capacidad de intercambio catiónico son bajas (Quintero *et al*, 2011). Es un material rico en potasio (3,000 a 3500 mg.L⁻¹) y fosforo (80 y 120 mg.L⁻¹) y pobre en nitrógeno (menos de 100 mg.L⁻¹). Sus elevados contenidos iniciales de potasio y bajos de calcio y magnesio, crean la necesidad de aplicar enmiendas en los estadios iniciales del cultivo de clavel y rosa (Quintero *et al*, 2011). Cantidades importantes de manganeso son reportadas en la solución nutritiva y en el tejido de clavel, cuando la cascarilla de arroz quemada es utilizada como sustrato (Calderón y Cevallos 2001).

Otras propiedades fisicoquímicas reportadas de la cascarilla de arroz tanto nueva como usada son presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz tostada.

Propiedad	Valor*		Propiedad	Valor**		
	Cascarilla nueva	cascarilla usada		Cascarilla nueva	Cascarilla nueva	
Cenizas (%)	38,8	18,1	Cenizas (%)	12-13	Hierro (ppm)	200-400
Materia Orgánica (%)	61,2	81,9	Nitrógeno (%)	0,50 -0,60	Manganeso (ppm)	200-800
Densidad real (g.mL ⁻¹)	1,8	1,63	Fosforo (%)	0,08-0,1	Cobre (ppm)	3-5
Densidad Aparente (g.mL ⁻¹)	0,42	0,19	Potasio (%)	0,20-0,40	Zinc (ppm)	15-30
Porosidad Total (%)	76	88	Calcio (%)	0,10-0,15	Boro (ppm)	4-10
pH (1:1,5)	6,9	6,6	Magnesio (%)	0,10-0,12		
CE (1:1,5)(dS.m ⁻¹)	1,22	3,55	Azufre (%)	0,12-0,14		
CIC (meq.100g ⁻¹)	20,3	32,1	Silicio (SiO ₂)(%)	10-12		

Fuente: * Medina, 2001; **Calderón y Ceballos, 2001. Citados por Botero (2007).

1.1.2 Fibra de Coco

La fibra de coco ha sido considerada como un material alternativo adecuado como sustrato para siembra de plantas sin suelo bajo sistemas de cultivos protegidos o semiprotegidos. Constituye un excelente sustrato por su buena capacidad de retención de humedad, con una alta capacidad de aireación, pH ligeramente ácido y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) elevada lo que es muy importante para el establecimiento de regímenes de riego y fertilización, permitiendo una fertilización intermitente (alternando riegos con solución nutritiva completa y con agua clara, incluso permitiendo fertilizantes de fondo) (Alarcón, 2000).

Los niveles de algunos nutrientes asimilables son muy bajos, particularmente nitrógeno, calcio y magnesio, mientras que fósforo y potasio son elevados. A pesar de ser un material orgánico, su descomposición es muy lenta debido a su elevado contenido de lignina. La fibra de coco empleada en hidroponía debe tener una alta relación carbono/nitrógeno, para que se

mantenga estable químicamente el sustrato (Abad *et al.*, 2005). El hecho de tratarse de un material que no se contrae ni apelmaza y, aunque quede totalmente seco, recupera la misma capacidad de retención hídrica, lo hacen un importante mejorador de las propiedades físico-químicas de suelos y mezclas de sustratos. Conviene resaltar que la capacidad de retención hídrica es enorme, puede tener hasta 8 veces su peso en agua, incluso puede verse aumentada con el uso, ahora bien no toda el agua retenida por este sustrato está disponible para el cultivo (Alarcón, 2000).

Algunas propiedades de la fibra de coco son presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades químicas de la fibra de coco

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
CE (dS.m ⁻¹)	0,06 - 2,9	Micronutrientes	(ppm)
CIC (meq.100g ⁻¹)	60 - 130	Azufre	25
Lignina (%)	60 - 70	Hierro	1,2
pH	5,6 - 6,9	Manganeso	1,1
Macronutrientes	(ppm)	Zinc	0,7
Nitrógeno	17	Cobre	0,4
Fosforo	15	Boro	0,1
Potasio	253	Aluminio	1
Calcio	70	Cloro	26-1000
Magnesio	460		

Fuente: Mora (1999). Citados por Botero (2007).

1.2 Propiedades de los sustratos

1.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de gran importancia, porque una vez que el sustrato esté en el contenedor, y la planta esté creciendo en él, no es posible

modificar sus características físicas básicas. Esto contrasta con el *status* químico de los sustratos que permiten algunas modificaciones mediante técnicas apropiadas.

La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire, así como su variación en función del potencial matricial. Los métodos de determinación de las relaciones aire-agua de los sustratos difieren de los métodos utilizados en los suelos con el mismo fin, en sustratos se aplican intervalos de succión mucho más estrechos para conocer las curvas de retención de humedad, dado que en contenedores las plantas no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, y dado el medio limitado en que crecen y se desarrollan (Abad *et al.*, 2005).

1.2.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas caracterizan la transferencia entre el sustrato y la solución del sustrato: reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (química), reacciones de intercambio de iones (físicoquímica) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímica). Los materiales orgánicos son los compuestos que contribuyen mayormente a las propiedades químicas de los sustratos, debido a la formación y presencia de las sustancias húmicas, el producto final de la descomposición de la materia orgánica (Abad *et al.*, 2005).

1.2.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La CIC se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso o de volumen del sustrato. Dichos cationes quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están disponibles para la planta. Los valores de CIC se emplean como base para calcular el porcentaje de saturación de bases, una cualidad de los suelos usada ampliamente en aspectos nutricionales (Abad *et al.*, 2005).

La CIC depende del pH. Los materiales muy ácidos tienen el complejo de cambio saturado de H^+ , liberan iones H^+ que se intercambian con los iones de la solución. Se puede saturar el complejo de cambio de un sustrato con determinados iones, los cuales pueden mantenerse mediante aportes continuos de una misma solución nutritiva y actúan como tamponadores de esta solución después del tiempo. En los sustratos con CIC elevada, conviene cargar el complejo de cambio con cationes en equilibrio compatible con la solución nutritiva (Burés, 1997).

1.2.4 Sales solubles

Las sales solubles son sales minerales disueltas presentes en un sustrato, provienen de los fertilizantes y de impurezas en el agua de riego. Todos los nutrientes del suelo que estén disponibles para absorción reciben el nombre de sales solubles, su contenido inicial debe ser bajo, para evitar daños en las plantas jóvenes que son sensibles a ellas. Medir la CE es la forma directa de establecer el contenido de sales solubles de una solución. Una alternativa para los suelos salinos, que a la vez permite contrarrestar la problemática de plagas y enfermedades, es el uso de cultivos sin suelo (Abad, 1993, citado por Abad *et al.*, 2005).

Las causas que originan un incremento en la salinidad del sustrato después de estar en el contenedor, son: 1) La presencia de fertilizantes insolubles (de liberación lenta), cuando se degradan para producir nitratos o bien, cuando liberan sales mediante difusión superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; 2) Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o a la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las perdidas por lixiviación; 3) Cuando el sustrato presenta una elevada CIC, y al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes (Alarcón, 2000).

1.2.5 pH

Para que el sistema radicular de la planta pueda absorber los nutrientes estos deben estar completamente disueltos en el medio, pero valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes ocasionando la no disponibilidad de los mismo para la planta. De igual forma el pH puede afectar el proceso fisiológico de absorción de los nutrientes por parte de las raíces, todas las especies vegetales presentan unos rangos característicos de pH en los que su absorción es idónea, saliendo de este rango la absorción radicular se ve dificultada y si la desviación en los valores de pH es extrema, puede verse deteriorado el sistema radical o presentarse toxicidades debidas a la excesiva absorción de elementos fitotóxicos como el aluminio (Abad *et al.*, 2005).

Los niveles de referencia en el cultivo de plantas ornamentales en contenedor en el extracto de saturación están entre 5,2 -6,3 (Abad *et al.*, 1993), el nivel óptimo de pH en el

cultivo de hortalizas sin suelo (disolución del sustrato) está entre 5,5 – 6,8 (Escudero, 1993).

La asimilabilidad de los elementos nutritivos es afectada de modo marcado por el pH. Con un pH de 5,0 a 6,5 la mayoría de los nutrientes mantienen su máxima nivel de asimilabilidad, por debajo de pH = 5,0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, B etc., mientras que por encima de pH = 6,5 puede disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu. Los óxidos metálicos (de Fe, Mn, Cu, Zn etc.) se hacen más solubles al bajar el pH. Los materiales orgánicos poseen mayor capacidad tampón (en un amplio intervalo de pH) que los sustratos minerales (Abad *et al.*, 2005).

1.3 El agua en cultivos sin suelo

El problema de los actuales sistemas de cultivo en sustratos radica en que generan una gran cantidad de lixiviados que son liberados al medio, ocasionando impactos ambientales negativos por el alto consumo de agua y el vertimiento de fertilizantes (Parra y Flórez 2006).

Según Guzmán (2006) los efectos de la solución fertirrigante lixiviada pueden ser minimizados a través de dos tipos de reciclaje de drenajes:

1. El reúso o reutilización, que hace referencia al empleo de la solución en un sistema abierto en dos o más cultivos sucesivos diferentes. Aquí lo más común es que el segundo cultivo sea menos exigente en cuanto a la calidad de la solución fertirrigada.
2. La recirculación, la cual pretende utilizar indefinidamente una misma solución para un mismo fin y cultivo, compensando o regenerando las pérdidas por lavados o evapotranspiración. Bajo este tipo de reciclaje cuando mayor sea el grado de recirculación mayor es el riesgo de acumulación de sales.

En ambos casos la calidad del agua de riego es determinante para la operatividad del sistema.

La recirculación de lixiviados, ha permitido hacer más eficiente este tipo de sistemas de cultivo, al respecto Magán y colaboradores (1999) reportan que la recirculación de lixiviados permitió disminuir un 28% el consumo de agua y un 44% el de fertilizantes en un cultivo de tomate, en comparación con el equivalente sin recirculación.

Marfá (2001) en investigaciones en clavel cv. Gaudina sembrado en perlita, encontró que el uso del sistema de recirculación disminuyó a un 2% el volumen de la solución nutriente (SN) lixiviada, mientras que el sistema análogo de cultivo sin recirculación de lixiviados drenó un 29% del agua total de la SN aplicada. Respecto al balance de nutrientes, en ese estudio se recirculó el 36% (691 kg/ha) del nitrógeno, el 36,1% (226 kg/ha) del fósforo y el 29% (924 kg/ha) del potasio aplicado, liberando únicamente el 2.1, 4.3, y el 0.8% de cada uno de estos elementos, respectivamente.

1.3.1 El agua de riego

La calidad del agua de riego es uno de los factores que más condiciona un cultivo en sustrato o hidropónico, pues determina que cultivos se pueden producir, y los tipos, prácticas y manejos de riego y fertilización a utilizarse (Cabrera, 2011).

La calidad del agua como “vehículo” a través del cual los elementos ingresan al sistema radicular, se establece a partir de sus propiedades químicas principalmente, determinando su contenido de sales a partir de la conductividad eléctrica (CE), su pH, alcalinidad, dureza total representada como una concentración de metales alcalinotérreos, y finalmente estableciendo el contenido de algunos iones en particular sodio, cloro y boro (Bolívar, 2011; Cabrera, 2011).

1.3.2 Salinidad

Se determina a partir de la CE medida en el agua o en la solución, dada la cantidad de sólidos disueltos y su capacidad para permitir el paso de la corriente. De la CE se puede derivar el conocimiento de la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) y el contenido de sales y la presión osmótica en atmosferas (Báez, 1999).

La salinidad afecta directamente el crecimiento y la calidad de las plantas debido a efectos osmóticos (reduciendo la disponibilidad de agua para la planta), a toxicidades específicas de iones o al causar desbalances nutricionales, estos efectos están en

función de la concentración y tipo de sales, así como de la sensibilidad de los cultivos (Gil, 1995).

Según la clasificación de la calidad del agua para riego de la FAO (Ayers y Westcot, 1985), no hay ninguna restricción de uso con una CE < a 0,7 (dS.m⁻¹), ligera o moderada con 0,7 – 3 (dS.m⁻¹) y una restricción severa con CE > 3,0 dS.m⁻¹.

1.3.3 Potencial de Hidrogeniones (pH)

La lectura del valor de pH es una medida que indica la concentración de iones de hidrógeno de una solución, indicando cuán ácida o alcalina es la misma, el pH es una propiedad relacionada con el crecimiento y calidad de las plantas en particular por su efecto sobre la disponibilidad de los nutrientes minerales (Cabrera, 2011), para que el aparato radical pueda absorber los distintos nutrientes. Valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes con lo que permanecen en forma no disponible para las plantas (Báez, 1999).

En rosa como cultivo prueba, reutilizando drenajes y a distintos rangos de pH, Dasgan y Ekici (2005) reportan que la absorción de Fe, Mn, Zn y Cu fue estimulada por un pH bajo, la absorción de B no se vio afectada y la absorción de Mo se vio obstaculizada por la disminución en los valores del pH. Sonneveld y Voogt (2001), mencionan que no siempre es el caso para Cu y Zn dado que hay una interacción con el tipo de quelato empleado (DTPA o EDDHA).

1.3.4 Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad del agua a neutralizar los ácidos. Es la concentración de álcalis solubles en la solución. Los bicarbonatos disueltos, como el bicarbonato de calcio (Ca(HCO₃)₂), de sodio (NaHCO₃) y de magnesio (Mg(HCO₃)₂); y los carbonatos, como el de calcio (CaCO₃) son los álcalis que más contribuyen a la alcalinidad de las aguas de riego, mientras que los hidróxidos disueltos contribuyen muy poco en la mayoría de los casos (Nutriterra, 2011).

La capacidad del agua para neutralizar ácidos establece su poder tampón (“buffer”), y se refiere a la habilidad del agua para mantener estable el pH cuando se le añaden ácidos o

bases. Esto indica que cuando mayor sea la alcalinidad del agua más estable su pH y va requerir mayores aplicaciones de ácido para causar reducciones del mismo. Si situaciones como la mencionada no se corrigen con el tiempo, se puede elevar significativamente el pH hasta llegar a niveles no deseables que causaran reducción en el crecimiento y calidad de las plantas (Cabrera, 2011; Báez, 1999).

1.3.5 Dureza

La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos o bicarbonatos), se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro en la calidad del agua (Soto, 2009).

La aplicación de aguas con concentraciones altas de bicarbonatos, calcio y magnesio usando sistemas de riego por aspersión formará y dejará precipitados y residuos indeseables en los sistemas de riego, causando por ejemplo obturación de goteros. El uso prolongado de aguas con concentraciones de bicarbonato mayores a 120 mg.L^{-1} muy probablemente causará problemas de pH en el sustrato o suelo y depósitos indeseables en las hojas (Cabrera, 2011).

Cuando el suelo o sustrato se deshidrata los iones de calcio y magnesio se combinan con bicarbonatos y carbonatos para formar sales altamente insolubles; como cal o dolomita incrementando el pH en macetas y suelo de invernadero, pero en menor medida en suelos de campo (Bunt, 1988; Handreck y Black, 1994).

1.3.6 Iones tóxicos

Algunos solutos tienen efecto tóxico directo sobre los cultivos. Según Báez (1999), los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad en que ocurren dentro de las plantas. Se producen cuando un ión absorbido se acumula en las hojas, por efecto de la transpiración, hasta un nivel que daña la planta. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua. Los iones de las aguas de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son cloro, sodio y boro (Maas, 1984, citado por Báez (1999)).

1.3.7 Agua y nutrientes en sistemas controlados

Cada cultivo tiene una tolerancia a algunos elementos que pueden tornarse tóxicos, y a la cantidad total de sales solubles que puede mantener en su entorno radicular sin merma importante de rendimientos (Alarcón, 2000). Estos niveles no deben sobrepasarse y ello se consigue mediante el adecuado control del volumen drenado. Con agua de buena calidad los porcentajes de drenaje serán menores mientras que aguas salinas solo permitirán cultivar especies más o menos tolerantes a la salinidad; además habrá que dejar un mayor volumen de drenaje para evitar el excesivo aumento de la CE en el sustrato y acumulaciones de elementos fitotóxicos (Alarcón, 1996). Esta es una de las razones por las que el empleo de sistemas cerrados es limitado. La pobre calidad de las aguas hace que rápidamente se acumulen elementos indeseables en la solución recirculante con lo que hay que desecharla. Para este tipo de sistemas es necesario una buena calidad de agua, con concentraciones de sodio y cloruros tales, que el cultivo pueda asimilarlos sin presentar síntomas de toxicidad (Alarcón, 1996).

En sistemas recirculados la acumulación de Na, Cl, y SO₄ en el ambiente de la raíz con cultivos de tomate y rosa crecidos en lana de roca, ha sido ampliamente reportado (Alarcón, 1996; Komosa, 2011; Sonneveld y Voogt, 2009), presentándose limitaciones en el crecimiento y en el rendimiento de las plantas por la acción toxica de estos elementos, e indirectamente por el incremento de la CE.

En estudios realizados en tomate bajo un sistema abierto y uno de recirculación de drenajes, comparando la acumulación de nutrientes en el sustrato (perlita), agua y tejido, Dasgan y Ekici (2005) mencionan que la acumulación de micronutrientes en el sistema cerrado no fue importante, a su vez mencionan que en las últimas semanas en el sustrato de recirculación una ligera acumulación de Zn>Mn>Cu fue encontrada. El análisis de tejido de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) mostró que en ambos sistemas, la concentración estuvo bajo el límite de rango óptimo para Fe, Mn y Cu. Solo la concentración de Zn en el tejido mostró niveles adecuados para las plantas de tomate cultivadas.

En un ensayo similar realizado en tomate Komosa *et al.*, (2011) encontraron que además de la acumulación de Na, Cl y Ca en la SN del sistema recirculado, Zn fue el único microelemento que aumentó su concentración. De forma contrastante el Fe determinado

en la SN del sistema no recirculado fue el de mayor acumulación, al parecer la mala aireación de este sistema limita la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} formando compuestos insolubles de hierro.

1.4 Principales características de los elementos analizados

1.4.1 Hierro

El hierro es tomado por las raíces de las plantas como Fe^{+2} y Fe^{+3} , siendo preferente su absorción por la forma divalente. La tendencia del hierro a formar quelatos complejos y su aptitud para cambiar su valencia, son las dos características más importantes en las que se basan sus numerosos efectos fisiológicos (Barber, 1995). Los quelatos de Fe^{+3} y ocasionalmente del Fe^{+2} son por lo tanto las formas dominantes del hierro soluble en el suelo y soluciones nutritivas (Navarro y Navarro, 2000).

El hierro forma fácilmente complejos con varios ligandos, y por esto modula su potencial redox. Los dos principales grupos de proteínas que contienen Fe son las proteínas hemo y las proteínas Fe-S. Las proteínas hemo-porfirina, por ejemplo, facilitan el transporte de los electrones en la respiración. Otras proteínas hemo incluyen la citocromo oxidasa, catalasa, peroxidasa y leghemoglobina, una proteína que confiere el color rosado a los nódulos en las raíces de las leguminosas (Barker y Pilbeam, 2006). La biosíntesis de la clorofila comparte la misma vía de biosíntesis de las proteínas hemo a protoporfirina y a pesar de que la clorofila es una molécula que no contiene Fe, necesita de este micronutriente en tres periodos de su biosíntesis (Kirkby y Römheld, 2007).

La clorosis presente en plantas deficientes en hierro no es solamente una expresión del efecto del hierro en el desarrollo y función de los cloroplastos para la biosíntesis de clorofila. Las menores concentraciones de carbohidratos en plantas deficientes indican también una reducción de la actividad fotosintética (Kirkby y Römheld, 2007).

Los primeros síntomas visibles de deficiencia de hierro aparecen como clorosis en las hojas jóvenes. En la mayoría de las especies, la clorosis aparece entre las nervaduras en un reticulado fino, sin embargo, las nervaduras permanecen verdes en acentuado

contraste con el fondo verde más claro o amarillento del resto del tejido. Las hojas más jóvenes pueden carecer completamente de clorofila (Mengel y Kirkby, 2000).

En el caso de las plantas de hoja estrecha, los síntomas son un poco más difíciles de identificar (en relación al magnesio en particular), se presentan en forma de banda entre los nervios, franjas amarillas alternadas con los nervios verdes (Loué, 1988).

La interacción fósforo - hierro tal vez sea la más conocida, interacciones entre el hierro y los elementos metálicos (Mn, Cu y Zn) también pueden favorecer las deficiencias de Fe, en caso de exceso de estos (Fageira, 2001). En la interacción Fe x Mn cantidades demasiado elevadas de Mn en el medio nutritivo en relación al Fe puede inducir síntomas de clorosis de Fe. El antagonismo no es a nivel de absorción sino al de la actividad enzimática, el Mn compite en las locaciones metabólicas ocupadas normalmente por el Fe. (Loué, 1988).

En tejido foliar de especies ornamentales el contenido de hierro, puede oscilar de 50 a 300 ppm, siendo para clavel de 50 a 150 ppm el nivel adecuado en hojas (Ortega, 2008; Price, 1986).

1.4.2 Manganeso

El manganeso en su forma divalente (Mn^{+2}) es la forma disponible para las plantas y como es realmente transportado dentro de las células de la raíz y dentro de los tallos (Marschner, 1995). En el medio de crecimiento la mayor parte del manganeso se halla en las formas tri- o tetra-valentes, en compuestos insolubles, principalmente de óxidos, y, en menor grado, en especies divalentes no accesibles a los vegetales combinado por ejemplo, con materia orgánica (Alarcón, 2000; Gil, 1995). Como la forma absorbible por la planta es la reducida, los suelos ácidos y pobremente aireados favorecen la disponibilidad de manganeso ya que, a estas condiciones, las especies tri y tetra-valentes pueden reducirse a la divalente. De modo inverso, en suelos bien aireados y de pH alto, el manganeso se oxida y se adsorbe mucho más fácilmente, por lo que las plantas pueden exhibir síntomas de deficiencia, al hallarse el elemento como Mn_2O_3 y MnO_2 . Esta oxidación también puede darse de forma biológica por la oxidación de microorganismos (Gil, 1995).

El manganeso tiene importantes funciones en el metabolismo de las plantas, particularmente en los procesos siguientes: activación de diferentes enzimas, síntesis de la clorofila, fotosíntesis, reducción de nitratos, y síntesis de aminoácidos y proteínas (Loué, 1988).

Los iones de manganeso activan varias enzimas en las células vegetales, particularmente, las decarboxilasas y las deshidrogenasas involucradas en el ciclo del ácido tricarboxílico (ciclo de Krebs). Este elemento juega un papel importante en la reacción fotosintética que produce oxígeno a partir del agua; (Taiz y Zeiger, 2002). El manganeso desempeña un importante papel en los procesos redox, tales como en el transporte de electrones en la fotosíntesis y en la desintoxicación de radicales de oxígeno libres (Taiz y Zeiger, 2002). El manganeso forma metaloproteínas, que a su vez son componentes de solo dos enzimas, la enzima que rompe la molécula de agua en la fotosíntesis y superóxido dismutasa que contienen manganeso. También es el activador de varias enzimas (Salisbury y Ross, 1994).

Los cloroplastos son los más sensibles de todos los organelos de la célula a la deficiencia de manganeso, lo que lleva a la desorganización del sistema lamelar y a síntomas visibles de clorosis (Kirkby y Römhald, 2007). Por esta razón, la deficiencia de manganeso se parece a la deficiencia de Magnesio, porque ambas aparecen como clorosis intervenal en las hojas. Sin embargo, a diferencia de la deficiencia de Magnesio que aparece en las hojas viejas, los síntomas de deficiencia de manganeso son inicialmente visibles en las hojas más jóvenes (Loué, 1988).

Los síntomas en el caso de las dicotiledóneas se caracterizan frecuentemente por la presencia de puntos amarillos sobre las hojas. En esta fase la deficiencia de manganeso es por lo tanto muy diferente de la clorosis de Fe, donde el conjunto de la hoja amarillea salvo los nervios. En fases avanzadas únicamente los nervios y las zonas adyacentes se mantienen verdes (Loué, 1988; Kirkby y Römhald, 2007).

El nivel crítico de deficiencia de este micronutriente, para la mayoría de las especies, se sitúa en el rango de 10 a 20 mg kg⁻¹ según Kirkby y Römhald (2007). Para clavel el rango adecuado se encuentra entre 100 y 300 mg kg⁻¹ determinado a nivel foliar en base a materia seca (Price, 1988).

1.4.3 Cobre

El cobre es absorbido en forma de ion cúprico (Cu^{+2}) divalente en suelos que estén bien aireados, o bien como ión cuproso monovalente en suelos que estén húmedos y con poco oxígeno (Bonilla, 2008; Barker y Pilbean, 2006). El cobre se quelata en varios compuestos del suelo, por lo que proporciona la mayor parte del cobre a las superficies radicales. A menos que las cantidades se controlen con cuidado, el cobre se vuelve tóxico rápidamente en los cultivos en solución, en parte debido a las cantidades pequeñas que necesitan en solución (Salisbury y Ross, 1994).

La tasa de toma de cobre está entre las más bajas de todos los elementos esenciales, la toma de cobre por las raíces de las plantas es un proceso activo afectado principalmente por las especies de cobre presentes en el medio. El cobre es más fácilmente disponible a pH menores a 6, muchas fuentes reportan que la disponibilidad del cobre baja sobre pH 7 (Barker y Pilbean, 2006; Barber, 1995). Incrementos en el pH del suelo podría causar que el cobre se ligue más fuertemente a los ligandos del suelo. La biodisponibilidad del cobre es aumentada con condiciones de acidez bajas debido al incremento del ion Cu^{+2} en la solución. (Barker y Pilbean, 2006).

Varias proteínas que contienen Cu desempeñan un papel fundamental en procesos tales como la fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales superóxido y lignificación (Kirkby y Römheld, 2007). El papel del cobre en el metabolismo secundario es importante para incrementar la resistencia de la planta a enfermedades. La formación de lignina interpone una barrera mecánica contra la entrada de organismos y la producción de sustancias melanóticas también aumenta la resistencia, puesto que algunos de estos compuestos, como las fitoalexinas, inhiben la germinación de esporas y el crecimiento de hongos (Kirkby y Römheld, 2007). La falta de cobre afecta al crecimiento reproductivo (formación de granos, semillas y frutos) mucho más que al crecimiento vegetativo. En las flores de plantas con adecuado suplemento de cobre, las anteras (que contienen polen) y los ovarios tienen mayor contenido y demanda de este nutriente (Agarwala *et al.*, 1980).

Salvo para determinadas plantas y fases avanzadas de carencia no existen síntomas generales de la deficiencia de Cu particularmente típicos y fáciles de detectar, por otra parte, los cultivos difieren en su sensibilidad a la deficiencia (Loué, 1988).

Algunos síntomas de la deficiencia de cobre son clorosis, necrosis, distrofia foliar y muerte descendente. Los síntomas generalmente aparecen en los tejidos de los brotes, lo que es un indicativo de la pobre distribución de cobre en plantas con deficiencia de este nutriente (Loneragan, 1981); Otros síntomas típicos son reducción de la lignificación, que se asocia con caída de brotes y volcamiento, principalmente en cereales, y baja resistencia a enfermedades (Mengel y Kirkby, 2000).

El intervalo de suficiencia se encuentra entre 50 a 300 mg.kg⁻¹ en tejido foliar dependiendo de la especie ornamental utilizada (Ortega, 2008), en clavel Price (1986) referencia 50 a 150 mg.kg⁻¹ como contenido adecuado, siendo determinado en el quinto y sexto par de hojas particularmente.

1.4.4 Zinc

El zinc es tomado predominantemente como un catión divalente (Zn²⁺), en contraste con el Fe, Mn, Cu y Mo, el Zn es un elemento de transición que no está sujeto a cambios de valencia y está presente en las plantas solamente como Zn²⁺ (Kirkby y Römheld, 2007; Taiz y Zeiger, 2002). Es uno de los metales pesados más móviles en el suelo (Loué 1988), su solubilidad depende mucho del pH, la forma divalente es predominante a pH menores a 7,7, mientras que a pH superiores se encuentra la forma neutra Zn (OH)₂ (Barber, 1995).

La interacción de fósforo con Zn ha sido sobre todo estudiada bajo los aspectos de la formación de Zn₃(PO₄)₂ en el suelo, que es responsable de la deficiencia (Luoé, 1988). Fageira (2001) menciona que Zinc puede reducir el efecto toxico por la excesiva aplicación de boro en plantas.

El elemento funciona principalmente como catión divalente en metaloenzimas, algunas de las cuales ligan las enzimas y sus correspondientes sustratos, mientras que en otros casos, el zinc forma complejos tetrahídricos con el nitrógeno y el oxígeno, y particularmente ligandos de azufre en una variedad de compuestos orgánicos. Las plantas superiores tienen pocas enzimas que contienen zinc como la alcohol deshidrogenasa, anhidrasa carbónica y RNA polimerasa. Sin embargo, existen muchas enzimas que son activadas por el zinc. Los cambios en el metabolismo de la planta

inducidos por su deficiencia incluyen efectos sobre los carbohidratos, proteínas, auxinas y daños de la integridad de las membranas (Kirkby y Römheld, 2007).

La deficiencia de zinc es caracterizada por una reducción del crecimiento entre nudos, y como resultado la planta muestra un hábito de crecimiento arrosado, las hojas también pueden ser medianas y distorsionadas, con el margen de las hojas teniendo una apariencia arrugada, los síntomas pueden resultar de la pérdida de la capacidad de producir ácido indolacético. En algunas especies las hojas viejas pueden presentar clorosis intervenales y entonces presentar también desarrollo de puntos necróticos blancos. Esta clorosis puede ser una expresión de un requerimiento de zinc para la biosíntesis de clorofila (Taiz y Zeiger, 2002).

1.4.5 Boro

EL boro se encuentra en la solución del suelo bajo forma no disociada de ácido bórico (H_3BO_3) o como anión borato $\text{B}(\text{OH})_4^-$, el ácido bórico es una forma muy dominante y bajo esta forma es absorbido, aunque por ser ionizada puede ser más fácilmente lavable. En numerosas especies los síntomas de deficiencia se presenta con $15\text{-}20 \text{ mg.kg}^{-1}$ de boro en hoja, los contenidos normales y no excesivos se sitúan en $20\text{-}100 \text{ mg.kg}^{-1}$ y los síntomas de toxicidad aparecen generalmente a partir de 200 mg.kg^{-1} . Aunque su papel en la planta aún no es claro, la evidencia sugiere que interviene en la elongación celular, la síntesis del ácido nucleico, las respuestas hormonales y la funciones de las membranas (Alarcón, 2000; Taiz y Zeiger, 2002).

La investigación de los efectos del boro en diversos vegetales indican que es más un inhibidor que un activador y se ha sugerido que su función es reguladora del crecimiento y del metabolismo y, fundamentalmente, de la lignificación y diferenciación del xilema.

EL boro está involucrado en el transporte de azúcares, en la formación de complejos mono y diésteres estables, tanto con los azúcares como con difenoles que intervienen en la lignificación. La deficiencia de boro causa la muerte de los ápices de tallos y raíces y la abscisión de las flores, regiones todas de gran actividad metabólica que precisan gran cantidad de glúcidos solubles (Gil, 1995). Una gran proporción del boro de los vegetales se halla formando complejos en la pared celular al intervenir en la síntesis de hemicelulosas y otros materiales polisacáridos de la pared. También se atribuye al boro

un efecto estimulador de la germinación por sus implicaciones en la síntesis de giberelinas (Gil, 1995).

El primer síntoma en aparecer de la deficiencia de boro es la muerte del ápice del brote y de las raíces, que ya se manifiesta a las primeras horas, por su requerimiento en la síntesis de ADN, disparándose el crecimiento de los brotes laterales, donde vuelve a repetirse el fenómeno. Las hojas empiezan a arrugarse y deformarse y los peciolo y los tallos se rompen (Gil, 2002).

2. Materiales y métodos

2.1 Ubicación

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones del SENA-Centro Biotecnología Agropecuaria de Mosquera, Regional Cundinamarca, Colombia, ubicado a 4,7° norte y 74,2° este y a 2.556 msnm, durante el periodo de Noviembre del 2009 a agosto el 2010. La temperatura promedio anual fue de 13,1 °C, con una precipitación anual promedio de 1100 mm, 80% de humedad relativa y 4,6 h de brillo solar diario en el exterior del invernadero. La zona en mención se ubica en la cuenca media - alta del río Bogotá, con características de zona de vida de bosque seco montano bajo (Bsmb).

2.2 Siembra y establecimiento

Para el establecimiento del ensayo se utilizaron esquejes con raíz de clavel estándar variedad Delphi, se utilizaron camas elevadas de doble hilera, con dimensiones: 0,8 x 15 m y 0,15 m de profundidad máxima, en contenedores plásticos cóncavos, con sus respectivos canales de recolección de lixiviados. Teniendo finalmente, surcos de 6 plantas distanciadas 0,11 y 0,22 m entre surcos, para una densidad de 24,3 plantas por m² de invernadero.

Los invernaderos utilizados fueron construidos en madera, tipo comercial con un sistema de cortinas laterales manuales y ventilación cenital. Dentro de él se tuvo una temperatura promedio de 15.6 °C y una radiación fotosintéticamente activa de 7,8 MJ/m²/día.

Se construyeron 27 camas que fueron separadas por caminos de 0.6 m de ancho y un camino central de 2.2 m, para circulación de equipos y de operarios a cargo de las labores del cultivo.

Durante las tres semanas posteriores a la siembra se realizaron riegos frecuentes con manguera y poma N°1.000 para evitar la deshidratación del material vegetal. Al cabo de este tiempo se inició el suministro de agua y fertilizantes por el sistema de riego por goteo; para lo cual se instalaron cuatro líneas con 150 goteros cada una, para un total de 600 goteros/cama. Para controlar la cantidad de solución nutritiva aplicada se utilizó un sistema de riego computarizado automatizado como se describe en Cuervo *et al.* (2010).

La fertilización establecida para todos los tratamientos (tabla 3), se realizó siguiendo formulaciones comerciales. Como se observa tan solo para nitrógeno y azufre varió la concentración aplicada durante el transcurso del ensayo. La concentración de micronutrientes en la solución nutriente para la fase vegetativa y reproductiva fue idéntica. DTPA fue el agente quelatante empleado para la elaboración de las formulaciones empleadas durante el ensayo.

Tabla 3. Descripción de la cantidad en mg.L^{-1} de elemento utilizado para la nutrición de clavel estándar cv. Delphi, durante el transcurso del ensayo.

Elemento	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	B	Mo
Fase	mg.L^{-1}										
Fase Vegetativa	200	30	150	150	60	72	0,5	1	4	1	0,1
Fase											
Reproductiva	150	30	150	150	60	120	0,5	1	4	1	0,1

El control de plagas y enfermedades se manejó como de rutina en las empresas comerciales. Para el control de los problemas sanitarios se implementó un programa de monitoreo semanal de plagas y enfermedades, el cual sirvió de base para la toma de decisiones de aplicaciones preventivas o curativas, sin embargo en algunos casos se manejó el criterio de fumigaciones calendario (dos aspersiones por semana).

2.3 Actividades de producción

En la semana 6 después de siembra, se despuntó el tallo principal de las plantas “Pinch”, labor hecha a mano y sobre el sexto par de hojas. Después del *Pinch* se realizaron actividades de tutorado, es decir lo relacionado con construcción, montaje y

mantenimiento de la infraestructura de soporte para el crecimiento y desarrollo de tallos rectos. En este sentido se llevaron a cabo labores de cultivo como: empiole, encanaste y desbotone. El corte de la flor se inició cuando los tallos alcanzaron el punto de cosecha.

2.4 Muestreos

Las muestras de tejido foliar, de los sustratos, de los drenajes y del agua del reservorio se sometieron a caracterización química de hierro, manganeso, zinc, cobre, y boro. Así mismo, se midió productividad, calidad y longevidad floral de clavel sometidos a la recirculación de los tres drenajes.

Se realizaron muestreos destructivos en los siguientes estadios fenológicos: 1) *Primer pico de cosecha*, a las 27 semanas después de siembra (sds); 2) *Valle*, a las 34 sds; 3) *Transición de la fase vegetativa a la reproductiva*, a las 44 sds; 4) *Desbotone*, a las 48 sds; y 5) *Segundo pico de cosecha*, a las 54 sds. En cada estadio se tomaron muestras de tejido vegetal, sustrato y lixiviados. En total se tomaron 27 muestras por estadio, correspondientes a los tres sustratos, los tres porcentajes de recirculación y tres repeticiones. El muestreo de tejido vegetal fue destructivo y correspondió a una planta completa (raíz, tallos, hojas, brotes y botones). La muestra de sustrato se obtuvo en el mismo sitio donde se encontraba la raíz de la planta muestreada. La muestra de lixiviado se tomó de los drenajes de la cama correspondiente, presentes en el recipiente recolector el mismo día del muestreo de tejido vegetal y de sustratos. Para los análisis de las muestras se empleó el protocolo del Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (tabla 4).

Tabla 4. Propiedades químicas analizadas en los lixiviados, sustratos y tejido vegetal (planta entera de clavel), y relación de los métodos analíticos empleados.

Variable	Lixiviado	Sustrato	Tejido vegetal
pH	Potenciométrico	Lectura potenciométrica en el extracto de la pasta saturada	-
Conductividad eléctrica	Conductimétrico	Lectura conductimétrica en el extracto de la pasta saturada	-
Cu, Fe, Mn, Zn	Espectrofotometría de absorción atómica	Calcinación a 475°C, disolución de la ceniza con HCl 1:1; valoración por espectrofotometría de absorción atómica	
B	Tratamiento de la muestra con manitol; titulación potenciométrica	Calcinación a 475°C, disolución de la ceniza con HCl 1:1; tratamiento de la muestra con azometina-H; valoración por colorimetría a 410 nm	

2.5 Aguas

El agua utilizada para el fertirriego, fue obtenida de aguas lluvias y del reservorio del Centro Agropecuario SENA. En la aplicación del fertirriego se manejaron tres niveles de recirculación de lixiviados que correspondieron a 0, 50 y 100% de recirculación de la solución drenada por cama. Las propiedades químicas iniciales del agua de riego se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades químicas del agua de reservorio empleada durante el ensayo de campo.

pH	CE (dS. m ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹) ¹	SO PO NO NH				Ca	K	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	B	
			4	4	3	4										
6,44	0,9	93,7	60, 6	74, 6	12, 7	203	0,3 4	60, 7	42, 2	23, 9	52, 1	0,0 8	1,0 5	0,0 1	0,2 6	0,1 8

¹como CaCO₃

2.6 Sustratos

Los tres sustratos utilizados fueron: cascarilla de arroz 100% (100CAQ), cascarilla de arroz 65%-fibra de coco 35% (65CAQ) y cascarilla de arroz 35 %-fibra de coco 65 % (35CAQ). La cascarilla de arroz utilizada en el ensayo fue previamente quemada en un grado entre 70 y 100%.

Las propiedades químicas iniciales de los sustratos empleados se presentan en la tabla 6. Según los análisis, los sustratos presentan niveles relativamente similares de carbono orgánico, fósforo y potasio total. La fibra de coco presenta un pH y CE en la pasta de saturación visiblemente más bajos ya que al introducir porcentajes de 35 y 65% en la mezcla del sustrato, los valores de ambas variables disminuyen. Haciendo la misma deducción, los niveles de sodio y de hierro en la fibra de coco son más altos que en la cascarilla de arroz, mientras que los de manganeso son notablemente más bajos.

Tabla 6. Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo de campo.

Tipo	pH	CE	CO ¹	N	P	Ca	K	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	B	S
		(dS.m ⁻¹)					%						mg.kg ⁻¹		
100CAQ	5,53	6,82	27,2	0,51	0,06	0,11	0,01	0,04	0,03	4,4	225	136	53,5	27,9	481
65CAQ	5,31	6,52	23,6	0,39	0,08	0,40	0,01	0,06	0,08	13,4	433	87	50,0	34,4	470
35CAQ	5,18	6,04	26,6	0,50	0,06	0,16	0,01	0,10	0,17	19,1	704	66	46,6	-	548

1 Carbono orgánico oxidable

2.7 Diseño experimental

El diseño experimental correspondió a parcelas divididas en bloques completos al azar (BCA), para un total de nueve tratamientos con tres bloques o repeticiones (tabla 7). Las parcelas principales correspondieron a los porcentajes de recirculación y las subparcelas a los tipos de sustratos el esquema general del ensayo es presentado en el anexo 1, otros aspectos del ensayo se pueden consultar en Flórez *et al.* (2011). El análisis estadístico de los datos, a través de correlación simple (coeficientes de Pearson), análisis

de varianza (ANAVA) y pruebas de comparación múltiple (Tukey), se efectuó con el programa SAS versión 9.1 (Statistical Analysis System, 2004).

Tabla 7. Tratamientos a evaluar en clavel estándar var. Delphi cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes.

Tratamiento	Recirculación (%)	Sustrato
1		100 CAQ
7	0	65CAQ
4		35CAQ

2		100 CAQ
8	50	65CAQ
5		35CAQ

3		100CAQ
9	100	65CAQ
6		35CAQ

100CAQ = 100% cascarilla de arroz quemada; 65CAQ = 65% cascarilla de arroz quemada + 35% fibra de coco; 35CAQ = cascarilla de arroz quemada + 65% fibra de coco.

3.Resultados y discusión

3.1 Dinámica de las variables analizadas en los lixiviados

A seguir se discuten los análisis de varianza y el efecto de las fuentes de variación sobre el comportamiento de las variables pH y CE así como de los micronutrientes Fe, Mn, Cu, Zn y B; posteriormente, se discuten los resultados de cada variable analizando su dinámica en los lixiviados y su relación con el comportamiento de los demás componentes del sistema de cultivo analizados (sustratos y tejido de planta entera), a su vez, su comportamiento como consecuencia de los tratamientos empleados en el ensayo.

3.1.1 Efecto de los tratamientos (sustratos y recirculación) sobre la concentración de microelementos en los lixiviados

En la tabla 8 se presenta el análisis de varianza en diferentes estadios fenológicos para las variables medidas en los lixiviados, en la cual se verifican los casos donde hubo diferencia significativa por efecto de los tratamientos (tipo de sustrato, porcentaje de recirculación y sus interacciones), para $P < 0,01$ y $P < 0,05$.

En la mayoría de los casos no hubo diferencia significativa entre repeticiones, lo que indica que no se presentó la variabilidad esperada entre bloques, indicando que se mantuvieron bien controlados aspectos ambientales y de manejo del cultivo dentro del invernadero. En consecuencia, la interacción entre el tipo de sustrato y los porcentajes de recirculación resultó un mayor número de veces significativa, que la interacción repetición (bloque) porcentaje de recirculación.

Al respecto, en este tipo de diseños se suele sacrificar la precisión de la estimación de los efectos de los tratamientos asignados a la parcela principal, incrementando la

precisión para comparar los efectos asignados a los tratamientos de las subparcelas (Kuehl, 2001).

Tabla 8. ANAVA de las variables determinadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación; en evaluación realizada en diferentes estadios fenológicos.

Estadio	Fuente de Variación	pH	CE	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		Pr>F						
<i>Primer pico</i>	Sustrato	0,0052	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0135	0,1445	0,5767
	Repetición	0,4417	0,3239	0,3628	0,0897	0,1816	0,4198	0,9399
	Recirculación	0,0302	0,0007	0,0056	0,0095	0,0206	0,0431	0,0358
	Sustrato*Recirculación	0,1238	0,0082	0,0952	0,0004	0,5573	0,0413	0,5174
	Repetición*Recirculación	0,0115	0,6871	0,2706	0,4473	0,1755	0,0881	0,1157
<i>Valle</i>	Sustrato	<0,0001	0,2199	0,0065	0,0001	0,0155	<0,0001	0,1497
	Repetición	0,2905	0,3375	0,3154	0,0103	0,5383	0,8303	0,3855
	Recirculación	0,0239	0,1153	0,0746	0,1155	0,3286	0,1077	0,6016
	Sustrato*Recirculación	0,2423	0,1729	0,0552	0,4120	0,0924	0,0051	0,9482
	Repetición*Recirculación	0,3185	0,1030	0,2843	0,8282	0,2095	0,1642	0,4707
<i>Transición fase vegetativa a reproductiva</i>	Sustrato	0,1470	0,0021	0,0861	<0,0001	<0,0001	0,0022	0,3466
	Repetición	0,6989	0,1843	0,7365	0,3712	0,7261	0,3471	0,2541
	Recirculación	0,1599	0,0015	0,0427	0,0009	0,0033	0,0031	0,7490
	Sustrato*Recirculación	0,0039	0,3290	0,2660	0,0002	<0,0001	0,0092	0,0492
	Repetición*Recirculación	0,1201	0,0042	0,0904	0,8242	0,6482	0,1133	0,0241
<i>Desbotone</i>	Sustrato	<0,0001	<0,0001	0,0070	0,0001	<0,0001	0,0004	0,0084
	Repetición	0,3018	0,3423	0,7921	0,1488	0,0101	0,7872	0,8567
	Recirculación	0,1880	<0,0001	0,0506	0,6952	0,0009	0,0025	0,2424
	Sustrato*Recirculación	0,1948	0,0008	0,0028	0,0128	<0,0001	0,1394	0,4069
	Repetición*Recirculación	0,1580	0,3365	0,0131	0,3287	0,8887	0,6769	0,6285
<i>Segundo pico</i>	Sustrato	0,0004	0,3424	0,0021	0,0063	<0,0001	0,0228	0,0601
	Repetición	0,2140	0,6091	0,0669	0,1225	0,6095	0,6980	0,1493
	Recirculación	0,3604	0,0011	0,0004	0,0314	0,0111	0,0146	0,0703
	Sustrato*Recirculación	0,0007	0,0737	0,0204	0,0863	0,0003	0,1581	0,1351
	Repetición*Recirculación	0,1731	0,8232	0,9686	0,8578	0,0502	0,4406	0,3110

En negrilla se destacan los casos en que los tratamientos tuvieron un efecto significativo sobre las variables ($\alpha = 0,05$).

El efecto significativo de las mezclas de sustratos y de los porcentajes de recirculación sobre las propiedades químicas de los lixiviados, fue más frecuente que el efecto de las demás fuentes de variación del diseño, teniendo un comportamiento mucho más sistemático el factor sustrato en los últimos estadios que la recirculación utilizada.

Los micronutrientes Zn, Cu, Mn y la CE fueron las variables que mostraron diferencias estadísticamente significativas por efecto de la recirculación a lo largo del ensayo en la mayoría de los estadios evaluados, mientras que, Mn y Fe en cada uno de los estadios y pH, Cu, Zn y CE en cuatro de ellos, se vieron afectados por la mezcla de sustrato empleada.

3.1.2 Efecto de la recirculación en la composición de los lixiviados

La CE presentó diferencias altamente significativas por efecto de la recirculación en cuatro de los estadios evaluados. Es bien conocida la acumulación en sistemas recirculantes de iones sodio, cloruro y sulfato provenientes de la solución fertilizante (Guzmán, 2006). El potencial osmótico generado, el efecto tóxico de los iones y el desbalance en elementos nutrientes alteran y limitan la posibilidad de las soluciones para una reutilización prolongada.

En relación con la composición de microelementos en los lixiviados, el cobre fue el nutriente que presentó la tendencia más clara a aumentar por efecto de la recirculación en todos los estadios, excepto en *valle*. Los iones manganeso y zinc así como la CE también mostraron esa tendencia en el primero y en los tres últimos estadios evaluados. Como lo reporta Guzmán (2006), el problema de los sistemas cerrados radica en la alteración de la composición originaria de la solución nutritiva, generando usualmente la acumulación de iones, a veces a niveles nocivos.

El elemento hierro determinado en el lixiviado mostró diferencias significativas en función de la recirculación solamente en *primer pico*, *transición fase vegetativa a reproductiva* y *segundo pico de cosecha*; mientras que el boro fue el elemento que se vio menos afectado por los tratamientos con recirculación.

3.1.3 Efecto del tipo de sustrato en la composición de los lixiviados

El sustrato tuvo efecto sobre los valores de pH (tabla 8) siendo en algunos estadios altamente significativo, como se discutirá posteriormente, esto se ve expresado en la tendencia de los lixiviados a presentar menor acidez a medida que se aumentó el porcentaje de recirculación, aunque como resultado de la prueba de comparación de medias de Tukey, este incremento del pH no fue estadísticamente significativo en todos los estadios ni en todos los sustratos.

El comportamiento de hierro y manganeso en lixiviados se ve claramente influenciado por el sustrato utilizado, evidenciado en la significancia mostrada en todos los estadios, confirmando la actividad química de estos materiales y los procesos que tienen lugar en ellos. En este tipo de sustratos hay intercambios minerales con la solución, por ejemplo sustratos de constitución orgánica, tienen sustancias húmicas que tienden a retener cationes de la solución (Martínez y Roca, 2001), presentándose también procesos como descomposición y liberación o precipitación y retención.

Los elementos zinc y cobre presentaron diferencias significativas por el tipo de sustrato empleado en cuatro de los cinco estadios evaluados. Al igual que en el análisis del efecto de la recirculación sobre la composición de los lixiviados, el comportamiento de estos dos elementos es análogo ya que son las mismas fuentes de variación y generalmente en los mismos estadios donde se observan las diferencias significantes.

El boro se apartó del comportamiento de los demás elementos nutrientes analizados, mostrando un comportamiento errático ya que fueron distintas las fuentes de variación las que influenciaron su mayor o menor contenido en el lixiviado. Con este elemento solo algunas diferencias significativas en algunos estadios.

Respecto a la CE, ésta parece estar más influenciada por la recirculación que por el tipo de sustrato, muestra de ello es la significancia que se observa en solo tres de los cinco estadios evaluados (Tabla 8).

3.1.4 pH de los lixiviados

En las tablas 9 y 10 se presenta la composición química promedio de los lixiviados colectados y los coeficientes de variación.

Tabla 9. Estadística descriptiva de las propiedades químicas analizadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.

Descriptor	pH	CE (dS.m ⁻¹)	mg.L ⁻¹				
			Cu	Fe	Mn	Zn	B
N	135	134	135	134	134	133	133
Mínimo	3,93	1,01	0,04	0,25	0,01	0,13	0,07
Máximo	7,33	4,99	1,31	6,71	1,7	1,32	2,32
Media	6,04	2,44	0,61	1,89	0,22	0,5	0,89
CV (%)	13,35	35,08	39,39	78,44	137,75	42,24	45,1

Tabla 10. Promedios de las propiedades químicas analizadas en los lixiviados de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.

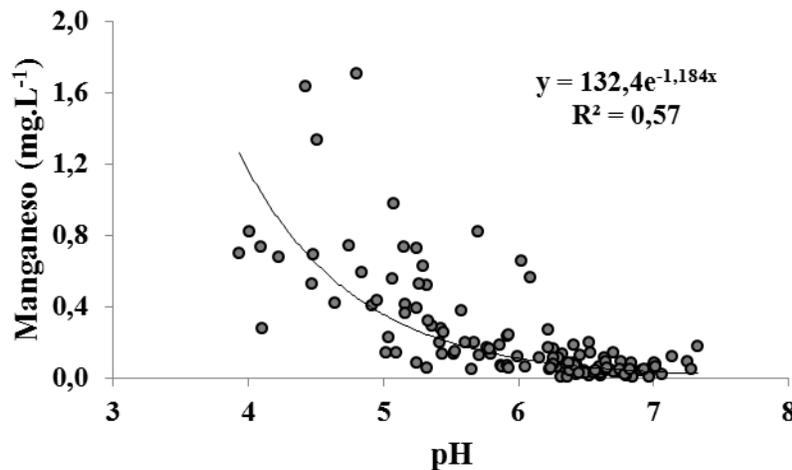
Tratamiento	pH	CE (dS.m ⁻¹)	mg.L ⁻¹				
			Cu	Fe	Mn	Zn	B
35CAQ	6,06	2,59	0,56	1,11	0,09	0,43	0,89
65CAQ	5,85	2,26	0,56	1,49	0,17	0,45	0,86
100CAQ	5,81	2,31	0,68	2,96	0,38	0,59	0,86
0%R	5,94	1,89	0,52	1,73	0,14	0,41	0,88
50%R	5,98	2,51	0,6	1,92	0,3	0,52	0,87
100%R	6,19	2,92	0,71	2,05	0,21	0,58	0,92

De las muestras colectadas, el 36% de los lixiviados analizados resultaron cercanos a la neutralidad, con pH entre 6,5 y 7,5. El 64% restante mostraron pH ácido, distribuido en un 37% con pH entre 5,5 y 6,5, un 21% entre 4,5 y 5,5 y el 6% restante entre 3,9 y 4,5. Esto indica que al menos el 70% de las muestras presentan valores de pH adecuados o muy cerca de valores adecuados (5,5 - 7,5). En suelos, Ortega (1997) considera como óptimo para clavel un pH de 6,2.

No se aconseja un pH del agua de riego muy alcalino (mayor de 8,4), ya que se pueden formar precipitados de carbonato o fosfato de calcio y magnesio (Bar-Yosef, 1999). Además, a pHs muy altos, se reduce la disponibilidad de Zn, Fe y P. Esta condición no se encontró en ninguno de los tratamientos.

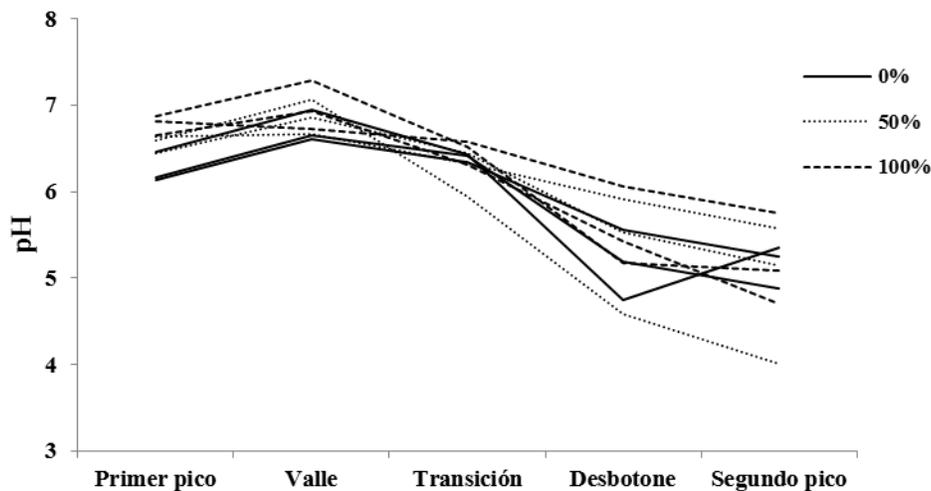
Por otro lado, a pH muy bajo (cercano a 4,0), la acidez es perjudicial para las membranas de las raíces y puede incrementar la concentración de manganeso a niveles tóxicos por disolución del sustrato. Además, Botero (2007) encontró que los sustratos con cascarilla de arroz liberan manganeso a la solución. La figura 1 muestra que los niveles más altos de manganeso tienden a presentarse en lixiviados con pH por debajo de 6,0. Este manganeso debe provenir del sustrato, ya que la fórmula de la solución nutritiva no incluye ninguna sal de manganeso en su preparación. Bar-Yosef (2008) menciona que se debe mantener el pH de la solución recirculante entre 5 y 6, lo cual es esencial para evitar la deficiencia de manganeso. Este mismo autor enfatiza que los nutrientes cuya solubilidad es más fuertemente dependiente del pH en las soluciones son Ca, P, Fe, Zn y Mn. Aunque Bar-Yosef (2008) reporta la dependencia entre el pH y el zinc en solución, en el presente estudio, sin embargo, no se observó dicha relación.

Figura 1. Variación de la concentración de manganeso en solución en función del pH de los lixiviados (N =132), en un cultivo de clavel estándar cv Delphi crecido en tres sustratos (35, 65 y 100 CAQ) y en con tres porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%R).



La figura 2 muestra que aunque casi todos los tratamientos muestran un aumento del pH para el estadio *valle*, la tendencia del pH de los lixiviados es decreciente con el transcurso del tiempo, entre el *primer* y *segundo pico de cosecha*. A diferencia de los cultivos en suelo, en los cuales el suelo tiene capacidad búfer que produce un efecto en la resistencia al cambio de pH de la solución del suelo, la solución nutritiva por sí sola no tiene poder búfer (Parker y Norvell, 1999). Los cambios en el pH de la solución pueden ser causados principalmente por desbalances en la toma de nutrientes en forma catiónica y aniónica. Cuando la toma de cationes excede la de aniones con respecto a la carga equivalente, la solución se acidifica (Marschner, 1995). La dificultad de mantener el pH de las soluciones nutritivas en un rango estrecho ha sido reportada, principalmente cuando las plantas están grandes (Parker y Norvell, 1999), lo que coincide con la tendencia de acidificación desde el estadio *transición de la fase vegetativa a la reproductiva* hasta el *segundo pico de cosecha*, periodo a través del cual hay más acumulación de biomasa vegetal.

Figura 2. Variación del pH en los lixiviados a través de los cinco estadios fenológicos evaluados para el cultivo de clavel. Cada punto en cada curva es el promedio de las tres repeticiones. Por cada tratamiento de recirculación se presentan las tres curvas correspondientes a los tipos de sustrato (sin diferenciar en la gráfica).



3.1.5. Conductividad eléctrica de los lixiviados

La CE de los lixiviados no sobrepasó en ningún caso los 5 dS.m⁻¹ (tabla 10). La reutilización de las aguas de drenaje debe fundamentarse en la calidad de estas, considerando la concentración total de sales disueltas (mg.L⁻¹) o la CE (dS.m⁻¹), ya que la toma de nutrientes es potencialmente inhibida por la alta salinidad de la solución (Bar-Yosef, 2008).

La FAO (1992) reporta niveles de CE y de algunos elementos que se deben considerar para evaluar el efecto de la calidad del agua de riego sobre la salinidad del suelo y la toxicidad. Aguas con menos de 0,75 dS.m⁻¹ no presentan ningún riesgo por salinidad, pero aguas con CE entre 0,75 y 3 dS.m⁻¹ presentan riesgo moderado. Según la CE medida en los lixiviados, sólo el 27% de las muestras presentarían un riesgo severo de salinización si se recircularan sin ser diluidas.

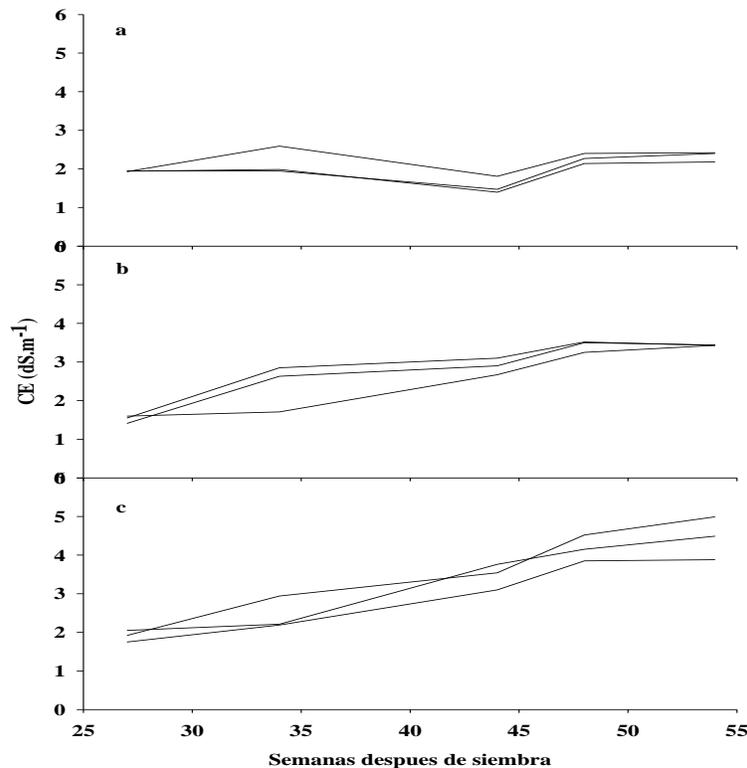
De acuerdo con el cuadro de clasificación de aguas para riego según el riesgo de salinización del US Salinity Laboratory Staff (1954), todos los lixiviados se encuentran sobre el límite de riesgo alto (0,75 dS.m⁻¹), es decir, en rangos según los cuales el uso de esta agua sin ser diluida representa un riego alto y muy alto de generar salinización en el medio del crecimiento de las plantas. No obstante, el clavel está reportado como un cultivo tolerante a condiciones de salinidad, tal como lo muestran Baas *et al.* (1995), quienes evaluaron el número de pedúnculos producidos por m², el peso y longitud de tallos y los días de vida en florero, de plantas de clavel regadas con soluciones de niveles crecientes de Na⁺ (3 a 32 mM), Cl⁻ (0 a 29 mM) y CE (1,9 a 5,8 dS.m⁻¹), en un sistema cerrado de circulación de nutrientes. Sólo encontraron efecto de la salinidad sobre la longitud del pedúnculo a partir de 23 mM de NaCl (4,8 dS.m⁻¹ de CE); las otras variables no se vieron afectadas por efecto de las soluciones más salinas. Además, indicaron que las concentraciones de elementos encontradas en los tejidos son similares a las del cultivar crecido bajo condiciones no salinas. Comparando con otras flores de corte, por ejemplo con gerbera, anturio, crisantemo y alstroemeria, en experimentos en suelo, Sonneveld (1988) encontró que el clavel fue menos sensible a la salinidad.

En los lixiviados colectados, la presencia de microelementos en forma catiónica (Cu²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ y Zn²⁺) y aniónica (H₂BO₃⁻) no afecta los valores de CE debido a su baja concentración, tal como lo indica la ausencia de correlación entre estas variables. Según Guzmán (2006), los micronutrientes contribuyen con menos del 0,1% de la CE. Entre tanto, en el presente

estudio, la CE de los lixiviados no se vio afectada por el contenido de microelementos en el sustrato o en el lixiviado.

La variación temporal de la CE en cada uno de los cinco estadios evaluados en el tratamiento con 35 CAQ se muestra en la figura 3. Se halló una tendencia de la CE a incrementarse por efecto de la reutilización de las aguas de drenaje, que podría estar indicando la acumulación de sales a través del tiempo, lo que induce a un aumento progresivo de la CE. Este incremento fue mayor para los tratamientos con 100% de recirculación, estando cercano a $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ al cabo de 54 sds, que corresponde al estadio evaluado *segundo pico de cosecha*. Un comportamiento similar se presentó en los tratamientos correspondientes a los otros dos sustratos (65CAQ y 100CAQ).

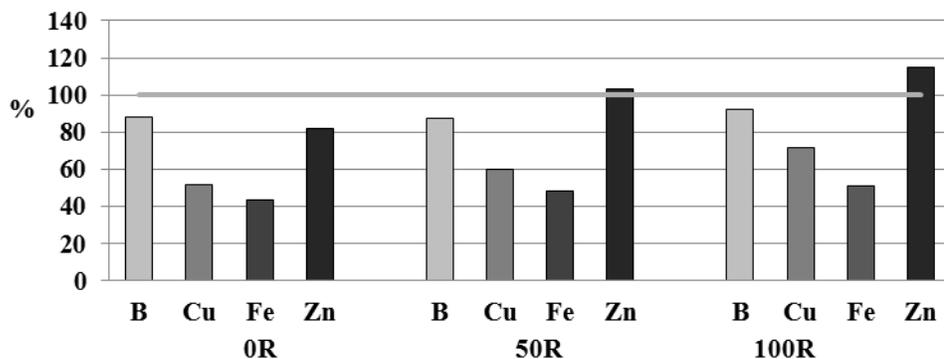
Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica en los lixiviados correspondientes al tratamiento 35CAQ (a: 0%; b: 50%; c: 100% de recirculación). Cada línea representa un bloque o repetición.



3.1.6 Microelementos en los lixiviados

La tabla 9 muestra la alta dispersión en la concentración de microelementos en los lixiviados. La mayor variabilidad la presenta el manganeso seguido por el hierro, los cuales son requeridos por la planta en cantidades relativamente mayores que los otros microelementos. La concentración máxima de microelementos hallada no se separa mucho de la composición inicial de las soluciones de fertirriego presentada en la tabla 3, indicando que ni siquiera en los casos de 100% de recirculación, la concentración alcanzó niveles demasiado altos. Al contrario, en la mayoría de los casos la concentración de estos disminuyó con respecto al nivel inicial, como consecuencia de su absorción por la planta. Por ejemplo, en el índice de aumento o disminución de la concentración del elemento en el lixiviado respecto a la solución fertirrigante (figura 4) se observa que con excepción del zinc en los tratamientos con recirculación, todos presentaron contenidos inferiores a los adicionados en la solución fertirrigante. En elementos como el hierro incluso se presentaron con relativa frecuencia niveles inferiores a 1.5 mg.L^{-1} .

Figura 4. Índice de crecimiento o disminución de los contenidos de boro, cobre, hierro, y Zinc en 0, 50 y 100 % recirculación, respecto a la solución inicial utilizada. Manganeso no fue incluido dado que no fue aplicado en la solución fertirrigante.



Según Parker y Norvell (1999), las concentraciones asociadas con deficiencias de los microelementos metálicos son mucho menores de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$; incluso, las actividades iónicas de metales libres para el crecimiento normal de las plantas puede corresponder a niveles tan bajos como 10^{-15} , 10^{-17} , 10^{-9} y 10^{-10} M para Cu, Fe, Mn y Zn, respectivamente.

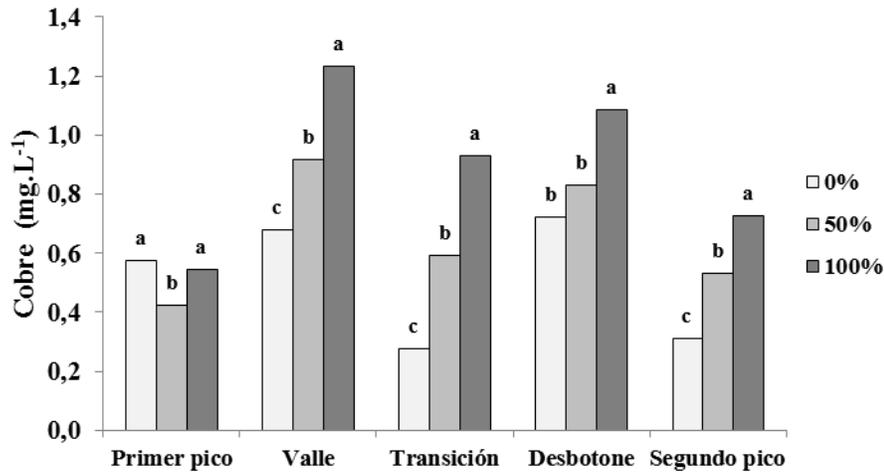
El cobre fue el elemento que mejor reflejó un cambio en la concentración en el transcurso del ensayo por efecto de la recirculación. Una comparación de los niveles de cobre presentes en los lixiviados colectados en las camas de clavel con el sustrato 100CAQ, para los diferentes porcentajes de recirculación y en cada uno de los estadios (figura 5), muestra un incremento significativo en la concentración del ion en los casos donde se reutiliza el lixiviado, siendo más marcadas las diferencias para los estadios *valle*, *transición fase vegetativa a reproductiva* y *segundo pico*.

Hay que tener en cuenta que en los casos donde se realiza fertirrigación con fórmulas estándar de microelementos, estos pueden aumentar considerablemente las concentraciones de aquellos metales más abundantes en el agua de riego hasta alcanzar valores no recomendables para los cultivos. Si se tiene en cuenta que el contenido de cobre en el agua del reservorio (tabla 5) de por sí ya es la mitad de la máxima concentración de este microelemento en aguas de riego (0,2 mg.L⁻¹) reportadas por Metcalf y Eddy (1995); Guzmán (2001); y Ayers y Westcot (1985), esto parece estar interviniendo en los mayores contenidos observados. De esta forma el 98% de los valores de cobre en los lixiviados están sobre los reportes antes mencionados, pero reiterando que aun así se encuentra por debajo de la concentración de la fórmula de fertirriego aplicada.

En un estudio de producción y calidad de rosas bajo invernadero sembradas en lana de roca y grava con un sistema de recirculación de nutrientes, Ehret *et al.*, (2005) encontró que el cobre fue el único elemento que permaneció en concentraciones constantes en el tiempo ($\approx 1.4 \mu\text{M}$), boro, manganeso, molibdeno y zinc decrecieron en este sistema mientras que nitrato, hierro sodio, fósforo, magnesio, calcio, potasio y azufre se incrementaron con la recirculación. En gerbera el reciclaje de la solución nutriente utilizando diferentes relaciones de cationes (K + Ca + Mg) y pumita como sustrato, no afectó el contenido de cobre a lo largo del ensayo ($\approx 1,3 \mu\text{M}$), sin embargo, por el efecto de otros iones se vieron afectados el número de flores por planta, longitud del tallo y diámetro de la cabeza (Savvas y Gizas, 2002).

Figura 5. Variación del contenido de cobre en el lixiviado en función de la recirculación utilizada en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi cultivadas en el sustrato 100CAQ.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



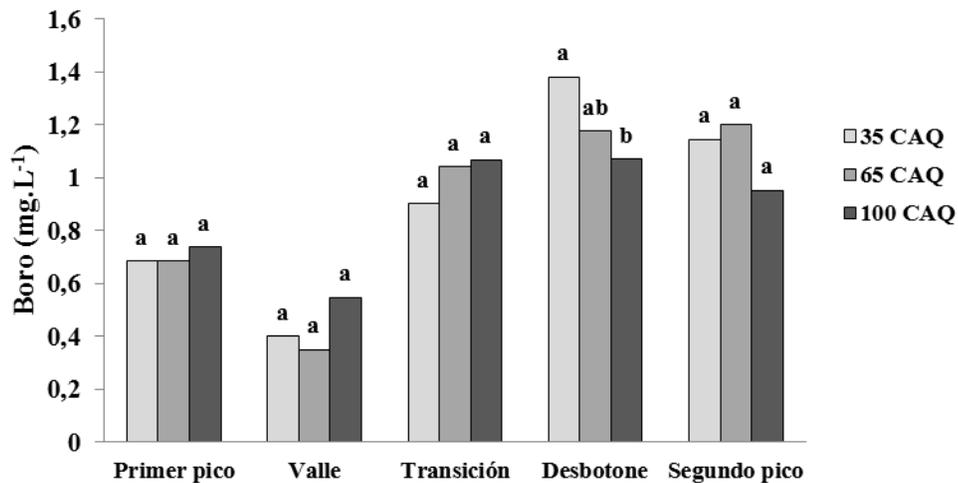
El boro puede llegar a ser tóxico para las plantas en concentraciones de unos pocos miligramos por litro en la solución del suelo, dependiendo del cultivo (Bar-Yosef, 1999). En el agua, el boro se presenta generalmente como moléculas no ionizadas, en forma de H_3BO_3 y al no ser retenido en los sitios de intercambio del suelo o sustrato puede ser fácilmente perdido por lavado (Fageria *et al.*, 2002). La FAO (1992) reporta que el uso de aguas de riego con niveles de boro superiores a 2 mg.L^{-1} representa alto riesgo de toxicidad. En el 36% de las muestras la concentración de boro en las soluciones de drenaje fue superior a 1 mg.L^{-1} (concentración de la solución nutritiva) y sólo una muestra superó los 2 mg.L^{-1} .

La dinámica de acumulación de boro en el lixiviado fruto de la recirculación utilizada no es evidente (anexo 2G). En la figura 6 se observa que aun cuando no se presentan diferencias entre las mezclas de sustratos empleadas en el ensayo, el contenido de boro tiende a acumularse en el lixiviado con el desarrollo del cultivo. No sólo el contenido y la disponibilidad del elemento determinan su absorción, también intervienen factores ambientales como temperatura, radiación solar y humedad relativa, a su vez, la relación con otros iones y su papel fisiológico son determinantes, probablemente es por ello que

los mayores contenidos de boro en el lixiviado no se correlacionan con mayores contenido en tejido.

Figura 6. Variación del contenido de boro en los lixiviados en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



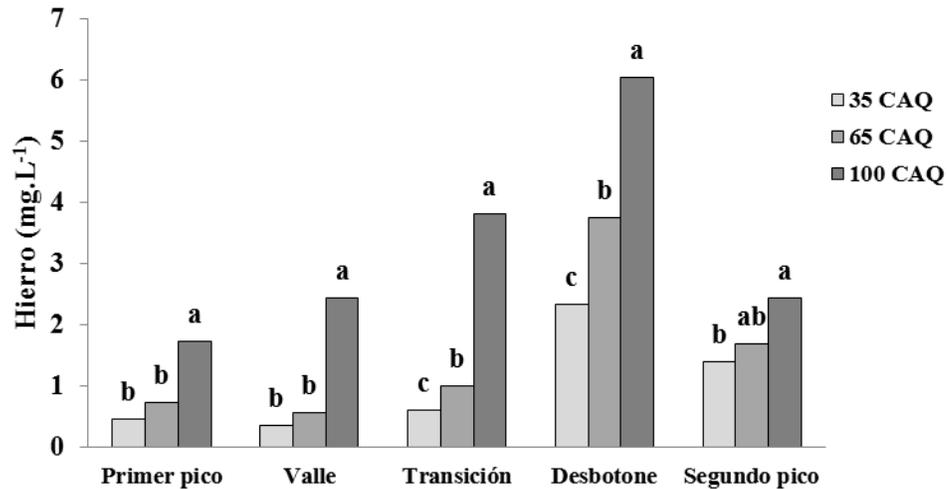
El hierro además de llegar a ser un elemento tóxico para los cultivos a altas concentraciones en los sistemas de fertirriego, es reportado como influenciador en el riesgo potencial de oclusión de sistemas de riego (García, 1997), por su interacción en reacciones que involucran formas de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros.

A pesar de la alta variabilidad presentada (CV 78%), el 94 % de las concentraciones de hierro en lixiviados se encuentran por debajo del límite máximo (5,0 ppm) reportado por Ayers y Wetscot (1985), como concentraciones máximas recomendadas en aguas de riego. El exceso puede contribuir a la acidificación del medio y a la pérdida de disponibilidad de fósforo y molibdeno, mientras que en aspersiones foliares puede dar lugar a depósitos no deseables en las hojas. El 55% de las concentraciones presentan una restricción de uso severo si se considera el límite reportado por García (1997) de 1,5 ppm, según la clasificación por capacidad de oclusión de sistemas de riego por goteo.

El hierro del lixiviado presenta una clara interacción con la mezcla de sustrato empleada, lo que se evidencia en cada porcentaje de recirculación en el tratamiento 100CAQ, estos valores son mayores a las restantes mezclas de sustratos (anexo 2C). A su vez, al observar los resultados en función de 100% recirculación, los mayores niveles de hierro en el lixiviado se presentaron con 100CAQ (figura 7), seguido del tratamiento 65CAQ donde se presentaron valores medios de hierro en el lixiviado.

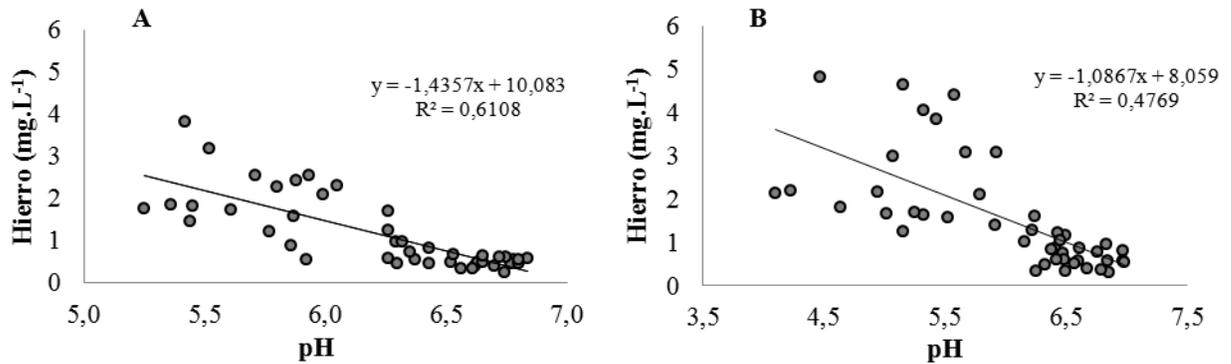
Figura 7. Variación del contenido de hierro en los lixiviados en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



El hierro además presentó una correlación negativa (-0,78 y -0,69) con respecto al pH en aguas (figura 8), siendo ésta evidente para los sustratos con fibra de coco en su composición (35CAQ y 65CAQ).

Figura 8. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de hierro en función del pH en los lixiviados (N = 45), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 35CAQ (A) y 65CAQ (B).



Está bien documentado que el pH afecta la solubilidad y la forma iónica de los microelementos en la solución (Parker y Norvell, 1999; Bar-Yosef, 2008) y, por lo tanto, su movilidad. Los microelementos, con excepción del molibdeno, son más solubles a pH ácido. Sin embargo, a pesar de que se esperaba una mayor solubilidad de los micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn a pHs más bajos, acentuada por la probable mayor disolución de los sustratos, no se encontró una correlación significativa entre el pH de los lixiviados y los microelementos, con excepción del manganeso ($r = -0,71^{**}$ figura 1) y hierro en los lixiviados resultantes de los tratamientos 35CAQ y 65CAQ (figura 8).

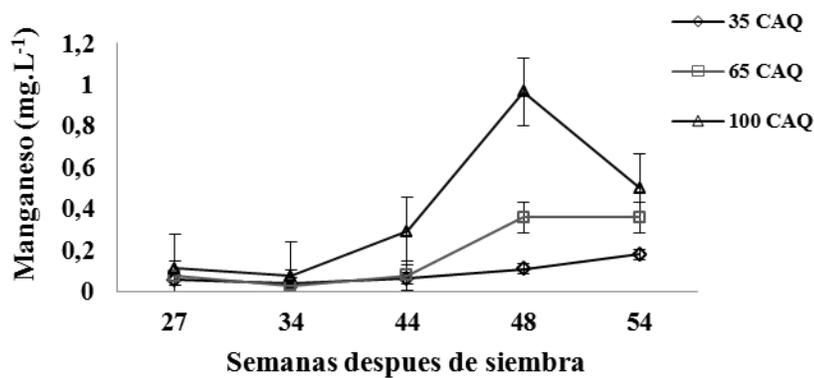
La figura 1 muestra claramente que a pH mayor de 6,0 disminuyen los contenidos de manganeso a valores menores de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$, los cuales están por debajo de la dosis recomendada por Ortega (1997), en la formulación de soluciones de fertirriego para cultivos de flores.

Farnham *et al.* (1985), citado por Parra y Flórez (2006), reportan como riesgo moderado a alto más de 1 mg.L^{-1} de manganeso en aguas de riego para cultivos hidropónicos en plantas ornamentales. Ayers y Westcott (1985) referencian $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de manganeso en aguas, como límite de restricción severo para su uso en riego. Al respecto, el 97 % de los datos están bajo el nivel de 1 mg.L^{-1} y aun el 81 % de los valores están en niveles inferiores a $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$.

Además de la correlación presentada entre el pH y el manganeso en el lixiviado (Figura 1) los tratamientos con mayor proporción de cascarilla de arroz quemada presentan los

niveles más altos de manganeso en los lixiviados (figura 9), confirmando así la liberación de este elemento a la solución por parte del sustrato. En lana de roca la liberación de este elemento también ha sido reportada (Sonneveld and Voogt, 1997), siendo particularmente afectada por el pH.

Figura 9. Comportamiento del contenido de manganeso en el lixiviado en función de los sustratos evaluados (35 CAQ, 65CAQ y 100CAQ), para los tres porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%), en un cultivo de clavel estándar cv. Delphi.



Los resultados del experimento muestran que la cantidad de cascarilla de arroz empleada y el pH de la solución recirculante son mucho más determinantes sobre el contenido de manganeso en la solución nutriente, que otras variables analizadas como el porcentaje de recirculación, la CE, la CIC o el aumento o disminución de algún otro elemento.

El aumento o caída rápida de estos contenidos en relación al pH y sus contenidos variables (anexo 2D) pueden ser atribuidos a la presencia de bacterias oxidantes de manganeso. Las bacterias se desarrollan a pHs altos y oxidan rápidamente el manganeso bivalente liberado el cual precipita como óxido de manganeso, a pHs bajos las bacterias difícilmente se desarrollan y todos los remanentes de manganeso en la solución son mucho más disponibles. Para tomate crecido en un sistema recirculante Sonneveld y Voogt (1980), mencionan la presencia de bacterias oxidantes y su interferencia en la disponibilidad del elemento, también, que las plantas al parecer serían capaces de tomar suficiente manganeso de la solución a pesar de que su contenido en la forma divalente parecería ser muy bajo. La adición al sistema de pequeñas cantidades de

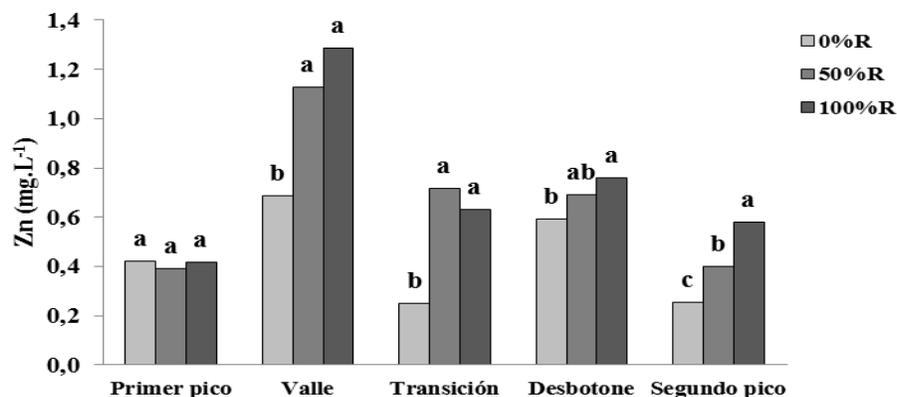
manganeso en la forma divalente en intervalos regulares puede ser suficiente, y proponen que las plantas serían capaces de utilizar óxidos de manganeso precipitados en el entorno radical.

El zinc es el único elemento que se encuentra en el lixiviado en niveles superiores a los de la solución fertirrigante, principalmente en 100R seguido de 50R, sin embargo el 100% de los valores de este elemento en el lixiviado se encuentran bajo el límite de $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$ reportado por Ayers y Westcott (1985) y Metcalf y Eddy (1995) como concentraciones máximas recomendadas en aguas de riego, incluso el 96% de los valores presentados se encuentran por debajo de la concentración de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$.

A diferencia de otros elementos como cobre y hierro, no se evidenciaron comportamientos sistemáticos de zinc en lixiviado (anexo 2F). En el tratamiento 35CAQ los mayores valores se presentaron en 100R, seguido de 50R, esto para los estadios *transición vegetativa reproductiva* y *desbotone*, en el tratamiento 100CAQ los tratamientos con recirculación presentaron mayores valores respecto al no recirculado excepto en el estadio *primer pico* (figura 10). Al observar las respuestas por porcentaje de recirculación, los sustratos 100CAQ y 50CAQ presentaron los mayores valores, pero sin significancia estadística en todos los estadios.

Figura 10. Variación del contenido de zinc en los lixiviados en función del porcentaje de recirculación utilizado en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100CAQ.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



Los altos o medios valores de zinc y de otros elementos en el lixiviado como consecuencia de los tratamientos empleados no necesariamente llevan a una mayor disponibilidad del elemento para el cultivo, o en el caso de valores bajos no necesariamente indica una menor disponibilidad de dicho elemento. Sonneveld y Voogt (2001) muestran que en condiciones de cultivo en invernadero Zn y Cu adicionados como quelato son menos disponibles para la planta que los agregados en forma iónica, a pesar de su alta solubilidad. Barber y Lee (1974) encontraron que la acumulación de zinc quelatado en la solución de un cultivo de remolacha, representó menos acumulación en tallos y raíces que el tratamiento sin quelatar. Sonneveld y Voogt (2009) encontraron que una inhibición de la absorción de Zn y Cu quelatado es responsable de su acumulación y por lo tanto de una alta concentración en el ambiente de la raíz en plantas de rosa, lo que entra en conflicto con una baja toma por la planta; de esta manera, se estableció una relación inversa entre la concentración del elemento en cercanías a la raíz y la concentración en los tejidos de la planta.

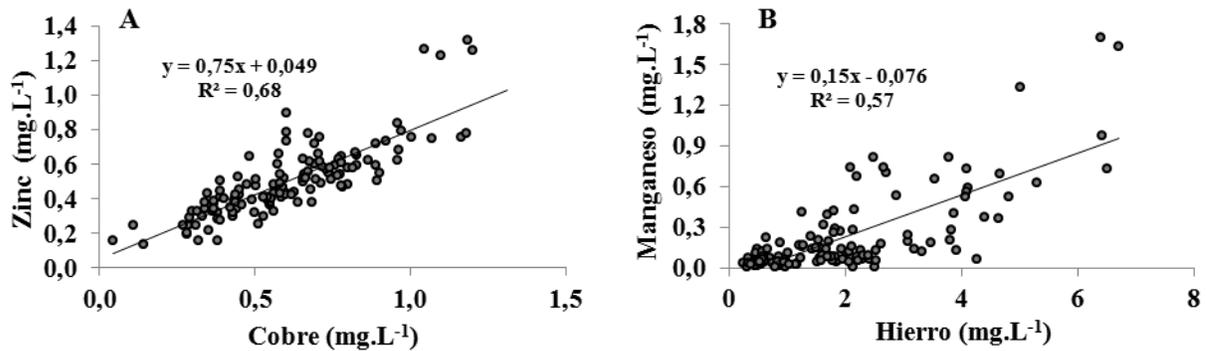
Como se menciona hay una discrepancia entre concentración, solubilidad y disponibilidad, lo que puede llevar a interpretaciones incorrectas de los contenidos de los nutrientes en la solución lixivante. La determinación analítica de los contenidos en tejido permitirá observar, para las condiciones del ensayo, si los contenidos y formas del zinc y los otros micronutrientes fueron adecuados.

Las disminuciones en la toma de algunos de estos nutrientes no solo puede ser explicada por competencia iónica, sino también por la formación de complejos de Zn y Cu con DTPA (Sonnevel y Voogt 2012), la formación de diferentes compuestos residuales fruto de la degradación de este compuesto con lo que estos iones se vuelven menos disponible para absorción por las plantas, la formación de complejos con sustancias húmicas del sustrato ó los exudados de la planta afectan también la adsorción de los micronutrientes.

Con respecto a las interacciones entre los microelementos presentes en los lixiviados, se hallaron relaciones positivas entre zinc y cobre y entre hierro y manganeso de $r = 0,82^{**}$ y $r = 0,76^{**}$, respectivamente (figura 11). Esto refleja una mayor afinidad entre los comportamientos de cobre y zinc, que se encuentran en la solución como cationes divalentes; y, entre manganeso y hierro, cuya valencia está condicionada por los

potenciales de óxido-reducción. Estos aspectos controlan su solubilidad, especiación y movilidad en la solución nutritiva. Este tipo de correlaciones han sido reportadas por Fageria *et al.* (2002); Gunes *et al.* (1998); y por Sonneveld y Voogt (2009).

Figura 11. Modelo de regresión lineal simple entre las concentraciones de zinc y cobre (A) y entre hierro y manganeso (B) en los lixiviados (N = 135), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 35CAQ, 65CAQ y 100CAQ con 0, 50 y 100%R.



3.2 Dinámica de las variables analizadas en los sustratos

A continuación se discuten los análisis de varianza y el efecto de las fuentes de variación sobre el comportamiento de pH, CE, CIC, Fe, Mn, Cu, Zn y B, así como los resultados de cada variable analizando su dinámica en los sustratos y su relación con las demás componentes del sistema de cultivo analizados (lixiviados y tejido), de la misma forma, el comportamiento de las variables como consecuencia de los tratamientos empleados en el ensayo.

3.2.1 Efecto de los tratamientos (sustratos y recirculación) en el contenido de los microelementos en los sustratos

El análisis de varianza de la tabla 11 muestra que las propiedades químicas del sustrato a lo largo del ensayo resultaron afectadas como consecuencia de la recirculación solo en unos casos aislados, es decir que las diferencias estadísticas no se mantuvieron entre estadios ni tampoco entre las variables determinadas. En este caso, es el factor sustrato

el que determina el comportamiento de los microelementos y de las variables analizadas dentro de él mismo, esto es evidenciado en el mayor número de diferencias significativas observadas por efecto de la mezcla de sustratos empleada.

En las variables determinadas en sustrato hubo diferencias entre repeticiones (bloques) principalmente en el estadio *valle* para Zn, Cu y Fe. Respecto a las interacciones sustrato-recirculación y repetición-recirculación, no se observan efectos significativos reiterados que permitan describir tendencias de su comportamiento.

3.2.2 Efecto de la recirculación en la composición de los sustratos

El efecto de los porcentajes de recirculación en cada una de las variables determinadas en los sustratos no es sistemático ni reiterado, concluyendo así que es probable que la composición intrínseca del sustrato sea la que determine su composición química en el transcurso del ensayo y no la solución que lo circundó.

El pH fue la variable que más se vio afectada en el sustrato en función de los porcentajes de recirculación utilizado, observándose efectos significativos en los estadios *transición fase vegetativa a reproductiva* y *desbotone*.

3.2.3 Efecto del tipo de sustrato en la composición de los sustratos

Dentro de los microelementos analizados en los sustratos, el boro fue el único elemento que presentó diferencias altamente significativas por efecto del tipo de sustrato en todos los estadios evaluados. Es conocido que la materia orgánica es determinante en la disponibilidad del elemento (Bonilla *et al.*, 1992; Marin, 1994; Fageira *et al.*, 2002); el boro es adsorbido por ligandos de intercambio y tales adsorciones son vitales para la disponibilidad del elemento (Goldberg, 1997).

Exceptuando el estadio *desbotone*, el hierro presentó diferencias significativas por efecto del sustrato en cuatro de los cinco estadios evaluados, mientras que, Cu Mn y Zn presentaron algunas diferencias sin exhibir tendencias claras.

Por su parte, el pH y la CE mostraron diferencias significativas en todos los estadios evaluados siendo para el pH altamente significativas, lo cual indica que el tipo de sustrato utilizado afecta el pH y la CE que se intenta mantener durante el ciclo productivo, dado que es éste quién por estas dos propiedades puede condicionar la disponibilidad de gran parte de los elementos nutrientes adicionados al sistema

Como era de esperarse, la variación de la CIC en todos los estadios es debida al efecto altamente significativo de la composición del sustrato, y no al efecto de las demás fuentes de variación.

Tabla 11. ANAVA de las variables determinadas en los sustratos de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación; en evaluación realizada en diferentes estadios fenológicos.

Estadio	Fuente	pH	CE	CIC	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		Pr>F							
Primer pico	Sustrato	<0,0001	0,0031	0,0003	0,1592	0,0002	0,2910	0,3621	0,0001
	Repetición	0,2302	0,1398	0,8387	0,7748	0,1089	0,0288	0,6569	0,4492
	Recirculación	0,0893	0,2980	0,3122	0,1145	0,2177	0,3695	0,5504	0,7990
	Sustrato*Recirculación	0,6578	0,5324	0,3550	0,5069	0,5289	0,5468	0,4392	0,1086
	Repetición*Recirculación	0,1419	0,1508	0,7921	0,0423	0,1444	0,9550	0,3444	0,0061
Valle	Sustrato	0,0010	0,0052	<0,0001	0,1502	0,0141	0,0146	0,2143	0,0002
	Repetición	0,0995	0,1426	0,0485	0,0136	0,0093	0,5324	0,0010	0,3400
	Recirculación	0,3414	0,6381	0,2699	0,0312	0,7837	0,5902	0,0617	0,4808
	Sustrato*Recirculación	0,7351	0,2639	0,9042	0,0131	0,0171	0,2696	0,1501	0,0068
	Repetición*Recirculación	0,2137	0,1411	0,8494	0,7722	0,8097	0,3435	0,9596	0,0716
Transición fase vegetativa a reproductiva	Sustrato	0,0002	0,0339	<0,0001	0,0191	0,0186	0,0496	0,8171	0,0009
	Repetición	0,3604	0,8190	0,2912	0,9457	0,9323	0,6769	0,9694	0,5544
	Recirculación	0,0081	0,2626	0,7238	0,7007	0,6453	0,3813	0,7337	0,9904
	Sustrato*Recirculación	0,3330	0,7020	0,5907	0,5599	0,1814	0,1972	0,9075	0,5042
	Repetición*Recirculación	0,9258	0,4880	0,1204	0,3074	0,1430	0,3469	0,3456	0,2673

Desbotone	Sustrato	<0,0001	0,0027	<0,0001	0,1993	0,4108	0,5402	0,9952	0,0005
	Repetición	0,1748	0,3375	0,0900	0,9795	0,4154	0,4215	0,7396	0,3838
	Recirculación	0,0287	0,3052	0,3903	0,8891	0,8547	0,9399	0,8419	0,1190
	Sustrato*Recirculación	0,8700	0,8970	0,4479	0,9398	0,5830	0,4755	0,5983	0,0965
	Repetición*Recirculación	0,6797	0,3058	0,1623	0,2388	0,3292	0,3407	0,4517	0,9535
Segundo pico	Sustrato	0,0075	0,0001	<0,0001	0,0023	0,0021	0,2049	0,0132	<0,0001
	Repetición	0,0364	0,1789	0,0219	0,6803	0,3588	0,5016	0,2154	0,0100
	Recirculación	0,3447	0,3940	0,1383	0,3080	0,1623	0,9583	0,8773	0,0109
	Sustrato*Recirculación	0,6324	0,0038	0,2315	0,9006	0,7708	0,7387	0,1974	0,2780
	Repetición*Recirculación	0,6444	0,0039	0,8956	0,2186	0,5323	0,1070	0,5435	0,9060

En negrilla se destacan los casos en que los tratamientos tuvieron un efecto significativo sobre las variables ($\alpha = 0,05$).

3.2.4 pH en los sustratos

En las tablas 12 y 13 se presentan los rangos de concentración de microelementos y de otras propiedades químicas determinadas considerando los tres tipos de sustratos empleados.

Tabla 12. Estadística descriptiva de las propiedades químicas analizadas en los sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco.

Descriptor	pH	CO	CE	CIC	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		%	ds.m ⁻¹	cmolc.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹				
N	134	135	130	134	134	135	135	133	134
Mínimo	4,52	20,46	4,56	27,76	2,77	148	31,4	11,4	7,96
Máximo	5,87	31,46	45,8	74,24	74,29	4041	333,9	99,4	69,85
Media	5,17	26,29	15,2	46,85	27,39	1278	157,5	40,9	30,8
CV (%)	5,24	9,77	52,14	28,35	48,0	64	30,5	40,6	43,4

Tabla 13. Promedios de las propiedades químicas analizadas en los sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco.

Tratamiento	pH	CO	CE	CIC	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		%	ds.m ⁻¹	cmolc.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹				
									40,7
35CAQ	4,98	28,48	10,8	60,72	31,11	1673	138,19	42,62	3
65CAQ	4,97	26,11	14,5	45,78	29,96	1369	160,11	41,2	30,9
									18,3
100CAQ	5,32	24,86	19,7	32,27	19,55	729	166,08	36,61	4
									28,8
0%R	5,11	26,48	12,8	46,99	31,54	1403	154,9	42,14	1
									32,3
50%R	5,24	26,67	17,3	46,54	26,23	1215	155,21	39,52	5
									31,2
100%R	5,28	26,30	15,8	48,06	24,5	1214	162,49	40,9	5

Como se puede observar, el pH de los sustratos generalmente resultó menor, en algunos casos incluso por el orden de una unidad, que el de los lixiviados. Probablemente durante la preparación de la pasta saturada para la lectura del pH, se presenta disolución de compuestos orgánicos y liberación de protones a la solución, produciendo un pH notablemente más bajo que el de la solución circulante. Esto resulta lógico si se considera que los lixiviados representan la solución que drena a través del sustrato en condiciones de sobresaturación, mientras que las pastas se preparan para alcanzar el punto de saturación; lo cual indica que los lixiviados corresponden a soluciones acuosas mucho más diluidas que los extractos y por lo tanto la concentración de H⁺ debe ser menor (Henao y Flórez, 2006).

Sonneveld y Voogt (2009) reportan que la principal razón para los cambios de pH durante el cultivo es la variación de las diferencias entre la toma de aniones y cationes por parte del cultivo. La toma de aniones está conectada con liberaciones de HCO₃⁻ e OH⁻, y la

toma de cationes está conectada con liberaciones de H_3O^+ por las raíces de las plantas. El intercambio de cationes y aniones es un proceso electroquímico que mantiene la carga eléctrica total entre la planta y la solución externa sin cambios. El intercambio ocurre en valencias equivalentes, así cuando la toma de cationes excede a los aniones el pH del ambiente radicular decrece y si es al contrario el pH se incrementa.

Teniendo en cuenta los resultados promedios entre sustratos el pH se encuentra dentro del rango óptimo para plantas ornamentales en contenedor, el cual oscila entre 5-5,2 a 6,5 en extracto de saturación (Martínez y Roca, 2011; Abad *et al.*, 2005); no obstante los óxidos metálicos de Fe, Mn, Cu, Zn por lo general se hacen más solubles a pHs por debajo de 5, pero pudiendo resultar fitotóxicos (Abad *et al.*, 2005).

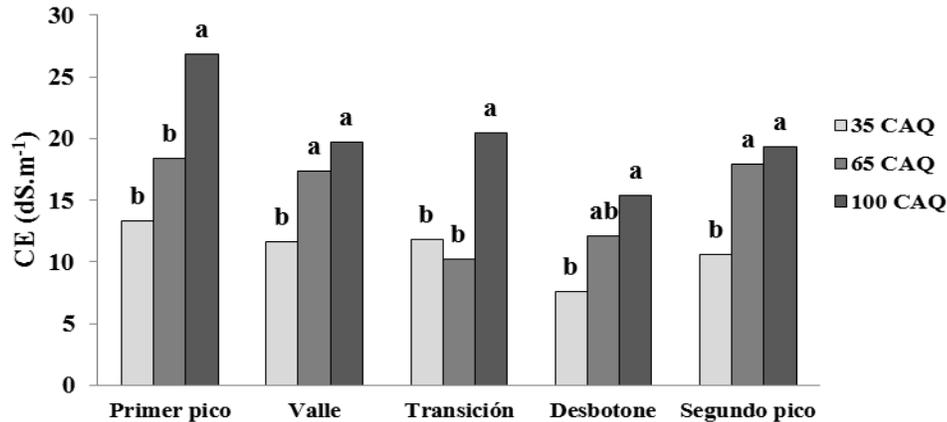
Los tratamientos con 100CAQ presentaron los valores mayores de pH (5,32 a 5,57), mostrando diferencias significativas con las dos mezclas restantes a lo largo del ciclo del cultivo. Esto concuerda con lo reportado por Casallas (2008), quien describe a la cascarilla de arroz quemada como un material con pH ligeramente ácido e incluso neutro. La medida inicial del pH de los sustratos, antes de ser empleados en los ensayos, mostró el pH más bajo en la mezcla con el porcentaje más alto de fibra de coco (35CAQ) (tabla 6). En el transcurso del ensayo el sustrato 100CAQ mantiene los mayores valores de pH (anexo 2H).

3.2.5 Conductividad eléctrica de los sustratos

El valor de la CE en el sustrato en función de los porcentajes de recirculación no presenta diferencias significativas en ninguno de los estadios, se observa una tendencia de menor CE en los tratamientos sin recirculación (anexo 2I). Cuando se analizó la CE en función de los sustratos se encontró que 35CAQ fue significativamente menor a 100CAQ, en todos estadios evaluados (figura 12).

Figura 12. Variación de la CE en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



La CE del sustrato resultó mucho mayor que la del lixiviado, en el orden de 6 veces su magnitud, pasando de un promedio de 2,44 ds.m⁻¹ en el lixiviado a 15,2 ds.m⁻¹ en el sustrato. Es claro que a esta CE las plantas de clavel no pudieron haberse desarrollado, por lo tanto estos valores no reflejan el ambiente de crecimiento de la planta. El método de cálculo sobre el extracto de la pasta saturada parece inapropiado para esta determinación, ya que la manipulación necesaria para llegar a la pasta pudo haber generado que ésta se deshiciera, liberando iones que de otra manera no interactuarían de forma inmediata con la solución circulante y con las plantas que en él se establecieron.

El rango ideal de CE para un sustrato, en el extracto de saturación es de 0,75 a 2 ds.m⁻¹ (Bunt, 1988; Cadahía y Eimar, 1993). Aunque Brunt y Montarone, (1987) mencionan que el clavel tolera hasta 8 g.L⁻¹ de sales y a partir de este nivel se reduce su crecimiento; sin embargo el nivel óptimo en el ambiente radical estaría de 2 a 6 g.L⁻¹. Abad *et al.* (2005) consideran que la CE del extracto de saturación de un sustrato de cultivo es satisfactoria para la mayoría de plantas en un rango de 2 a 3,5 dS.m⁻¹, mientras que un valor por encima de 5 dS.m⁻¹ resultaría nocivo.

El clavel aparece reportado por Abad *et al.* (2005) como una planta tolerante a la salinidad. Para Sonneveld y Straver (1994), los valores de EC recomendada para los cultivadores holandeses de

clavel en lana de roca debe ser menor a $2,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Sooneveld y Voogt (2009) mencionan como umbral para flores de corte crecidas en sustrato una CE entre 1 y $2,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Se han encontrado en suelos cultivados valores umbral para flores entre 3,4 y $4,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en el extracto de saturación, estos valores corresponden a valores de 5,3 y 6,2 en la solución del suelo, respectivamente (Sooneveld *et al.*, 1990).

Para cultivos en suelo los valores de CE recomendados en la solución son generalmente mucho mayores que las recomendadas en la solución de sustrato. La razón para que estos valores umbral sean mucho más altas pueden ser atribuidas a la gran diversidad espacial y el mayor volumen de raíz disponible para los cultivos crecidos en suelo (Sooneveld y Voogt, 2009).

La CE está relacionada con la concentración de las sales solubles presentes en el extracto de la pasta de saturación del sustrato; las causas que contribuyen al incremento en la CE del sustrato son la presencia de fertilizantes insolubles en exceso, cantidades de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante superiores a las cantidades absorbidas por la planta y a una CIC elevada del sustrato, que a su vez se descompone con el transcurso del tiempo liberando nutrientes adicionales (Abad *et al.*, 2005).

En este tipo de sistemas de recuperación de drenajes buena parte de los problemas agronómicos derivan de la progresiva alteración de la composición originaria de la solución nutriente y, por tanto, el sustrato para recircular debe reunir todas las garantías frente a procesos de dilución y de biodegradación que puedan influir en la composición de los drenajes. Castañón y Brañas (2007) mencionan que los sustratos minerales y artificiales no deben generar problemas al respecto, sin embargo, con los sustratos orgánicos conviene actuar con prudencia llevando un mayor control de los mismos.

Dada que estos procesos de acumulación involucran tanto al sustrato como agente retenedor y a la solución como agente transportador, se esperaba una correlación entre estas dos variables, sin embargo esta no fue significativa.

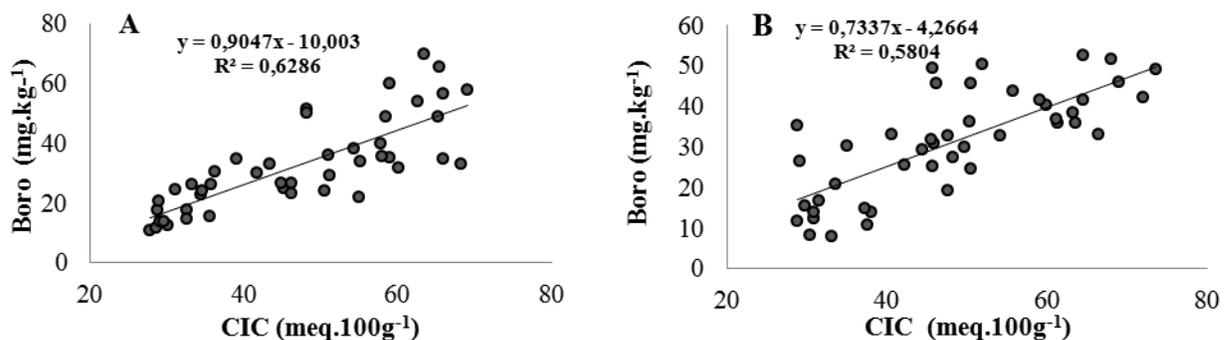
3.2.6 Capacidad de intercambio catiónico

La descomposición de la materia orgánica tiene dentro de sus productos más importantes la formación de sustancias húmicas, uno de los componentes que contribuyen mayormente a la

química de los sustratos (Lemaire, 1997; Abad, 2005; Lora 2010). La materia orgánica, especialmente las sustancias húmicas contienen grupos funcionales cargados negativamente (carboxílicos, fenólicos, enólicos, etc), que son los responsables de la capacidad de los materiales orgánicos para retener los cationes en forma no lixiviable. Durante el proceso de intercambio catiónico los iones orgánicos cargados negativamente son capaces de adsorber cationes (NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , entre otros) en proporciones variables, en función de la afinidad del catión por los sitios de adsorción y de su concentración en la solución (Abad, 2005; Lora, 2010).

Estos grupos carboxílicos, fenólicos y en menor grado los grupos alcohólicos, metoxílicos y amínicos presentan carga dependiente del pH por hidrólisis del H^+ (La carga positiva se incrementa al disminuir el pH, mientras que la carga negativa lo hace al aumentar el pH) confiriéndole un carácter anfótero (presencia de cargas negativas y positivas, por tanto, poder de retención de aniones y cationes) (Lora 2010). Esto podría explicar no solo el comportamiento del boro frente a cada tipo de sustrato (que se discutirá más adelante), sino la correlación presentada entre el boro y la CIC (Figura 13), donde se presenta una correlación positiva entre la CIC del sustrato con tratamientos de recirculación y el boro retenido en el mismo.

Figura 13. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de boro y la CIC en los sustratos (N = 45), para clavel estándar cv Delphi cultivado en 50 (A) y 100%R (B).



La densidad de carga o sea la cantidad de cargas por unidad de superficie y la naturaleza del coloide en última instancia la determina la capacidad de cambio de una sustancia. Lora (2010) menciona que especialmente para cargas variables o

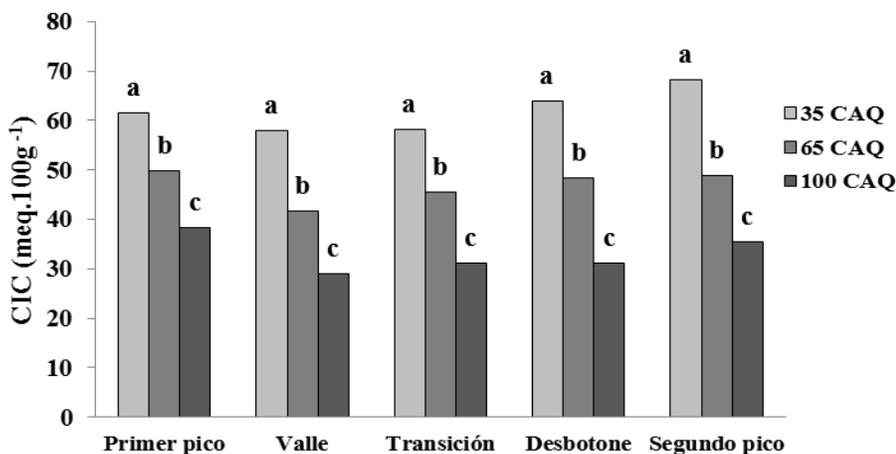
dependientes de pH, cuanto menor sea el tamaño de la partícula habrá mayor superficie y, por consiguiente, mayor exposición de grupos ionizables y mayor hidrólisis de iones H^+ y, por tanto, la aparición de cargas negativas. Estas son las dos condiciones que junto a las propiedades de los sustratos descritas en el apartado inicial, le confieren, por ejemplo una mayor CIC a la fibra de coco y una menor a la cascarilla de arroz; la diferencia en este parámetro para los sustratos empleados es conocida (Alarcón, 2000; Abad, 2005; Quintero, 1999; Casallas 2008; Calderón y Ceballos, 2001).

Es de resaltar que esta propiedad se muestra constante en el transcurso del ensayo (figura 14), donde 35CAQ presenta diferencias significativas sobre las restantes mezclas de sustratos, a su vez, 65CAQ es significativamente mayor que 100CAQ y menor que 35CAQ. Al observar la CIC de los sustratos en función de la recirculación ésta no ejerce ningún cambio en esta propiedad, razón por la cual no se presentan diferencias significativas entre tipos de recirculación empleadas (anexo 2J).

El sustrato 35CAQ a lo largo del ciclo del cultivo presentó una CIC promedio de $62,1 \text{ cmolc.kg}^{-1}$, a su vez y consecuentemente 65 y 100CAQ presentaron menores valores, $46,8$ y 33 cmolc.kg^{-1} , respectivamente.

Figura 14. Variación de la CIC en las mezclas de sustratos empleados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi cultivados en 35CAQ, 65 CAQ Y 100CAQ con 0, 50 Y 100%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



Para Lemaire *et al.* (1989) el valor óptimo de la CIC de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de aplicación del fertirriego. Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de los cationes no constituye ninguna ventaja, siendo en este caso recomendable la utilización de materiales inertes, con nula o muy baja CIC, sí, por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente la utilización de sustratos con moderada a elevada CIC. Para abad *et al.* (1993) la CIC no debe ser mayor de 20 cmolc.kg^{-1} preferiblemente.

Por otra parte, materiales orgánicos que poseen una elevada CIC, poseen una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrientes y del pH, previniendo así desbalances por manejos imprecisos, cualidad que debe ser considerada.

3.2.7 Micronutrientes en los sustratos

En la tabla 13 se presentan los rangos de concentración de microelementos y otras propiedades químicas considerando las tres mezclas de sustratos empleados; Estas concentraciones se apartan de manera importante de la composición inicial de los sustratos (tabla 6), sea por aumento o por disminución de los valores. En el caso de aumento, se podría explicar por procesos de acumulación en la superficie del material relacionados con fenómenos de adsorción o de precipitación, y, en el caso de disminución, podría obedecer a la degradación o descomposición del sustrato con la subsecuente liberación de elementos y movilización en los lixiviados.

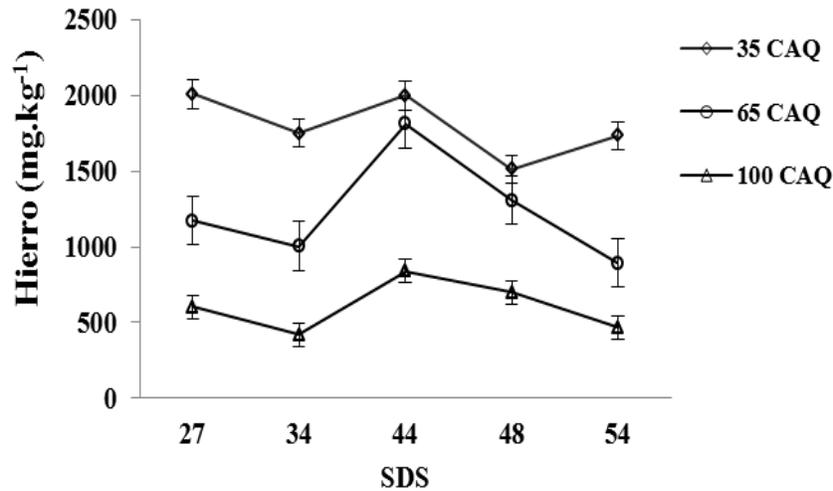
El método de extracción por pasta saturada puede estar interviniendo en la variabilidad presentada en las concentraciones de los microelementos, así como en las demás determinaciones realizadas. Al respecto, Abad *et al.* (2005) menciona que el método de pasta saturada es frecuente cuando las muestras son pequeñas y se pueden trabajar durante un mayor lapso de tiempo, dado que este simula la saturación del sustrato en condiciones del cultivo en campo a capacidad de contenedor, pero también menciona que los niveles de referencia de los parámetros relativos al estado de fertilidad de los sustratos varían de acuerdo con el método de extracción utilizado, el sustrato y el tipo de cultivo.

El hierro es el microelemento que se encuentra en una mayor concentración en los sustratos, seguido por el manganeso. Cu, Zn y B se encuentran en magnitudes similares, presentando el primer elemento los niveles totales más bajos hallados en los sustratos. El hierro fluctuó entre niveles más bajos en el sustrato 100CAQ, lo cual es coherente con la composición inicial reportada (tabla 6), que indica que este material es más pobre en hierro total; tendencia similar se presenta con el cobre. En contraste con la determinación inicial de hierro en el sustrato sin uso, en el sustrato tratado se presentan contenidos de este elemento hasta 8 veces más altos. Este elemento al parecer es el que más se acumula en el sustrato. Resultados similares obtuvieron Triana *et al.* (2006) en cultivos de rosa en sustrato, donde se encontró hasta 1470 mg.kg^{-1} de hierro al final del ensayo; sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre los sustratos que contenían CAQ (100, 65 y 35 %). También se observó que la concentración de hierro en el sustrato aumentaba de acuerdo con la proporción de fibra de coco.

Ehret *et al.* (2005) mostraron que las concentraciones de la mayoría de micronutrientes (B, Mn, Mo, y Zn) en un sistema de cultivo con recirculación en rosa decrecieron. Sin embargo, el hierro se comportó de forma inusual, ya que sus concentraciones fueron mayores en las soluciones recirculadas que en el sistema sin recirculación, pero en todos los casos fueron menores que las concentraciones suministradas de 36 mM, posiblemente producto de la precipitación del elemento. Holley y Baker (1991), citando los trabajos de Messing y Peterson (1989) concluyeron que el hierro rara vez es un factor limitante en el cultivo de clavel.

Como se observa en la figura 15, los contenidos de hierro se comportan de acuerdo al sustrato empleado y oscilan en rangos disimiles, pero, constantes en el transcurso del desarrollo del cultivo.

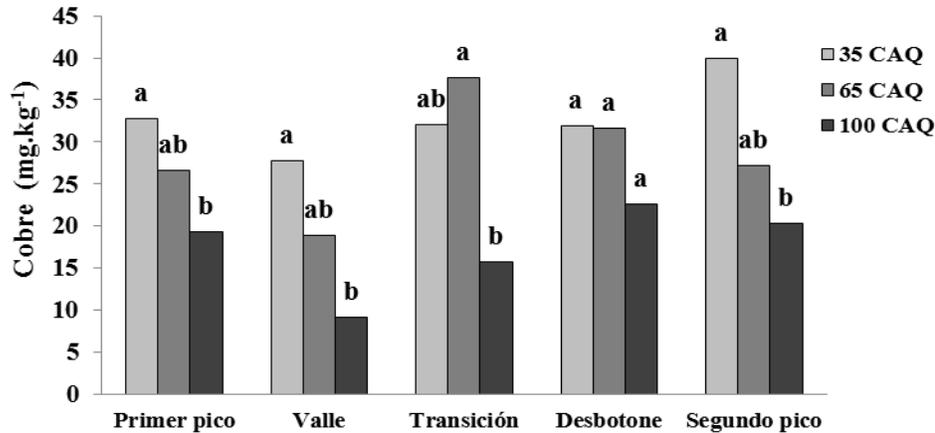
Figura 15. Comportamiento del contenido de hierro en el sustrato en función de los sustratos evaluados (35CAQ, 65CAQ y 100CAQ), para los tratamientos con 50 y 100%R, en un cultivo de clavel estándar cv. Delphi.



Contrario a lo observado en el lixiviado, en donde el cobre aumentó su concentración en el lixiviado conforme aumentaba el porcentaje de recirculación, esta no influyó en el contenido de este elemento en el sustrato, en consecuencia, no presentó tendencias consistentes ni diferencias significativas reiteradas (anexo 2M). En general las mezclas con fibra de coco presentaron los mayores contenidos de cobre, siendo 35CAQ significativamente mayor en algunos estadios evaluados, como observa en la gráfica 16. La mayor CIC de la fibra de coco aumenta la proporción de cationes que pueden ser adsorbidos sobre sus centros activos. Los materiales orgánicos y especialmente las sustancias húmicas, contienen grupos funcionales cargados negativamente (fenólicos, carboxílicos, enólicos, entre otros), que son los responsables de su capacidad de retener cationes de forma no lixiviable (Abad *et al.*, 2005). Tanto la mayor CIC como el mayor contenido inicial de cobre presente en estas mezclas de sustratos con fibra de coco están determinando su mayor contenido a lo largo del ciclo del cultivo.

Figura 16. Variación del contenido de cobre en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 50%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



Los valores medios de cobre obtenidos en el ensayo ($27,4 \text{ mg.kg}^{-1}$) (tabla 12) son similares a los valores reportados por Triana *et al.* (2006) en un cultivo de rosa (promedio a primer pico de 26 mg.kg^{-1}) é incluso menores a los obtenidos por Botero y Flórez (2006) en un cultivo de clavel cv Nelson (promedio a primer pico de $42,8 \text{ mg.kg}^{-1}$) crecidos en ambos casos con las mismas mezclas de sustratos del presente estudio, pero, con solución a perdida. Abad *et al.* (2006) menciona como nivel óptimo de cobre asimilable en un sustrato orgánico niveles muy bajos de tan solo $0,001$ a $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ determinados en el extracto de saturación.

El manganeso tal vez sea el microelemento con el comportamiento más variable, fruto de la no adición en la solución fertirrigante y del poco control de los procesos y factores que determinan su concentración a partir de la descomposición y liberación del sustrato, así como también, de otras variables como el pH y la aparición de bacterias oxidantes que condicionan su disponibilidad. Esto le ha valido gran número de trabajos; Geering *et al.*, (1969), Bromfield (1978), Millaleo *et al.* (2010) entre otros. Sonneveld y Voogt (1980) mencionan por ejemplo que el manganeso disponible en la solución nutriente recirculante no es a menudo un indicador satisfactorio del manganeso tomado por el cultivo, ya que éste es capaz de obtener suficiente manganeso, incluso cuando los niveles son muy bajos.

Como se puede observar en el anexo 2L, el manganeso determinado en los sustratos presentó un comportamiento muy variable, no se observaron tendencias ni comportamientos claros. Se esperaba que el mayor contenido inicial de manganeso dado por la cascarilla de arroz se reflejara en mayores valores para los tratamientos 100CAQ y 65CAQ o para el tratamiento 100R en razón de su acumulación. Observando los contenidos de manganeso en función de los lixiviados, no se presentan diferencias significativas en ninguno de los estadios evaluados, mientras que cuando se analizó en función de los sustratos, tan solo en un estadio el tratamiento 35CAQ fue significativamente menor a los demás.

En relación al trabajo de Triana et al. (2006) en rosa y de Botero y Flórez (2006) en clavel, usando las mismas mezclas de sustratos y sin recirculación de drenajes, los contenidos de manganeso fueron mayores (389.3 mg.kg^{-1} y 272.2 mg.kg^{-1} , respectivamente) frente a $157,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ del presente ensayo. Petitt (2011) caracterizó químicamente un suelo y las mismas tres mezclas de sustrato en rosa en un sistema de cultivo a solución perdida ob

Con respecto al zinc determinado en el sustrato, éste no permite describir ningún tipo de comportamiento como consecuencia del sustrato o de la recirculación empleadas (anexo 2N), sus niveles son apenas ligeramente superiores en 6 y 8 mg.kg^{-1} a los reportados en los trabajos de Botero y Flórez (2006) y Triana et al. (2006) en clavel y rosa respectivamente, realizados en los mismos sustratos y con lixiviados a pérdida.

Las determinaciones de zinc en cada una de las mezclas de sustratos, no son consecuentes con los mayores o menores contenidos observados en las mismas mezclas previo al establecimiento del ensayo. En cambio, si se evidencia una disminución del zinc promedio en los sustratos del cultivo con respecto a la determinación realizada antes de ser utilizados, lo que indica que parte de este zinc inicialmente contenido en el sustrato es liberado a la solución circundante (tablas 6 y 13).

No se observaron correlaciones de zinc en sustrato con ningún elemento en ninguna de las otras fases analizadas.

El boro mostró una tendencia a presentar valores más bajos en el sustrato con 100CAQ, con respecto a las restantes dos mezclas, guardando la misma relación de la tabla 6 para este elemento entre el sustrato 100 y 65CAQ.

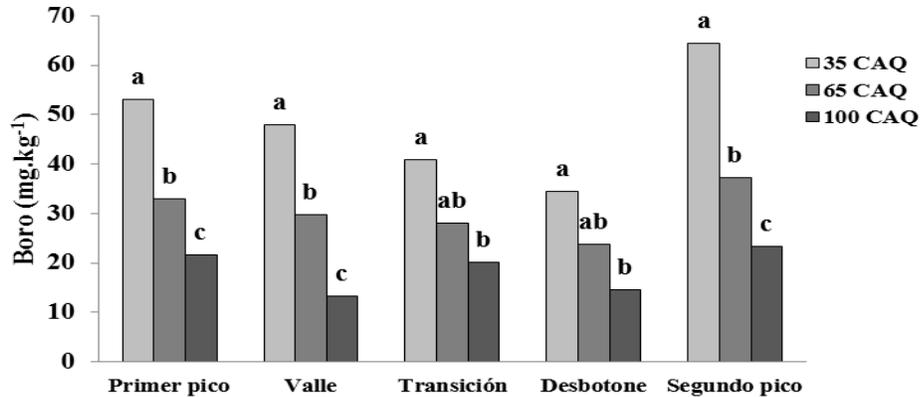
De forma similar, Triana et al. (2006) observaron aumentos en la concentración de boro en sustrato en cultivos de rosa a medida que disminuía la proporción de cascarilla de arroz; incrementándose su concentración con el desarrollo fenológico del cultivo. En la figura 17 se observa la variación de los contenidos de boro en sustrato para el tratamiento 50% de recirculación, en donde 35CAQ presenta diferencias significativas sobre los demás tratamientos, esto acorde al mayor contenido inicial del elemento en el sustrato, este mismo comportamiento se presenta en los demás porcentajes de recirculación, donde 35CAQ seguido de 65CAQ presentaron los mayores valores de boro en sustrato (anexo 2O).

De acuerdo con las relaciones establecidas, la disminución de los niveles de alguno de los elementos en el sustrato no correspondió con un aumento en el lixiviado, tal como se puede deducir por la ausencia de correlación entre las variables.

Boro y molibdeno son los únicos micronutrientes que ocurren en formas aniónicas (H_2BO_3^- y MoO_4^{2-}) y estos son sujeto de pérdidas por lavado. Sin embargo, la principal forma de boro retenido (el único no metal del grupo) puede ser la unida con la MO, principalmente como complejos de borato, con compuestos que contienen grupos hidroxilados (Stevenson 1991). El mayor número de sitios de intercambio dados por la fibra de coco al sustrato y debidas a grupos hidroxílicos (fenoles, alcoholes, cetonas) pueden estar contribuyendo a retener cantidades considerables del elemento, dando superficies particularmente eficientes en la adsorción aniónica.

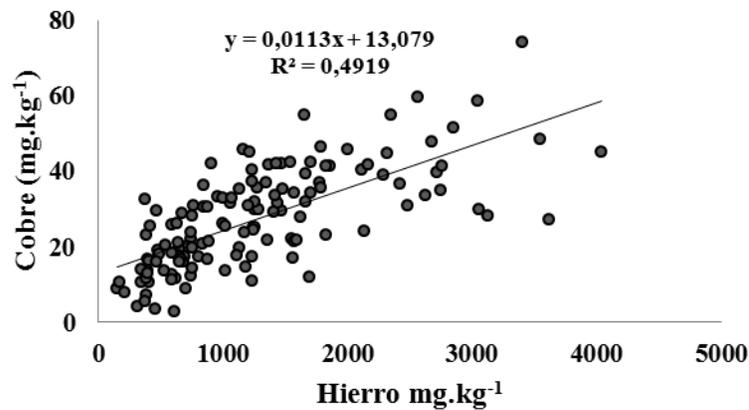
Además de la MO, el pH del medio juega un rol determinante en la disponibilidad del elemento. Incrementos en el pH disminuyen la disponibilidad de boro en suelos al aumentarse la adsorción de superficie por arcillas e hidróxidos de Fe y Al, se ha encontrado disminuciones en la toma del elemento cuando el pH de la solución crece de 6 a 9, se considera el pH ideal para su disponibilidad entre 5,5 y 6,5 (Stevenson 1991, Barber 1995). Sin embargo, en este estudio los cambios registrados en el pH tanto de los lixiviados como en los sustratos no se correlacionaron con disminuciones de su concentración en el tejido.

Figura 17. Variación del contenido de boro en el sustrato en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 100%R. Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



Las interacciones entre los microelementos determinados en el sustrato fueron escasas, presentándose una única correlación positiva entre cobre y hierro ($r = 0,7$) (figura 18). Estos dos elementos variaron en gran medida en función del sustrato empleado, con mayores contenidos para las mezclas con mayor contenido de fibra de coco, razón por la cual, cuando se correlaciona muestra a muestra las que corresponden a 35CAQ y 65CAQ presentan conjuntamente los mayores valores de estos dos elementos.

Figura 18. Modelo de regresión lineal simple de la concentración de cobre y de hierro en los sustratos 35, 65 y 100 CAQ en un cultivo de clavel estándar cv Delphi crecido en tres porcentajes de recirculación 0, 50 y 100%R. (N = 135).



3.3 Dinámica de las variables analizadas en el tejido vegetal

Como en los capítulos anteriores, en el apartado inicial se discuten los análisis de varianza y el efecto de las fuentes de variación sobre el comportamiento de Fe, Mn, Cu, Zn y B. También se discuten los resultados de cada la variable analizando su contenido en el tejido y su relación con el comportamiento en los lixiviados y sustratos, a su vez, su comportamiento como consecuencia de los tratamientos empleados en el ensayo.

3.3.1 Efecto de los tratamientos en la concentración de microelementos en el tejido vegetal

Como se observa en la tabla 14, hay un efecto escaso de los tratamientos sobre los niveles de microelementos en el tejido de la planta entera. Según Bar-Yosef (2008), la concentración de nutrientes en el tejido vegetal depende del estadio fenológico de la planta, de la tasa de absorción de nutrientes y del nivel promedio de salinidad de la solución nutritiva. El análisis de varianza permite observar que el tipo de sustrato y los porcentajes de recirculación no afectaron los contenidos de cobre, hierro, zinc y boro; sin embargo, la concentración del manganeso en el tejido vegetal se vio afectada de forma significativa por el sustrato a lo largo del cultivo. Es claro el aporte de manganeso que hace la cascarilla de arroz quemada, lo cual se refleja en un mayor contenido del elemento en la planta.

Tabla 14. ANAVA de las variables determinadas en el tejido vegetal (planta entera) de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación y evaluados en cinco estadios fenológicos.

Estadio	Fuente	Cu	Fe	Mn	Zn	B
		Pr>F				
Primer pico	Sustrato	0,2231	0,4787	0,0032	0,1350	0,0044
	Repetición	0,1219	0,4202	0,3201	0,8753	0,9948
	Recirculación	0,5081	0,6298	0,1301	0,9869	0,6273
	Sustrato*Recirculación	0,7432	0,0763	0,1195	0,1192	0,0448
	Repetición*Recirculación	0,7716	0,1322	0,8088	0,0526	0,0286
Valle	Sustrato	0,7812	0,1227	0,0002	0,6316	0,8770
	Repetición	0,0618	0,1698	0,4449	0,2983	0,6821
	Recirculación	0,4285	0,1591	0,8304	0,8720	0,2144
	Sustrato*Recirculación	0,4398	0,1592	0,7280	0,8591	0,5773
	Repetición*Recirculación	0,1410	0,4799	0,5358	0,1525	0,7933
Transición fase vegetativa a reproductiva	Sustrato	0,7397	0,4214	0,0012	0,7281	0,3895
	Repetición	0,0499	0,1414	0,0655	0,8276	0,4112
	Recirculación	0,5773	0,2442	0,0320	0,9688	0,8576
	Sustrato*Recirculación	0,2369	0,8529	0,4863	0,4689	0,6510
	Repetición*Recirculación	0,5332	0,8829	0,9847	0,1052	0,6621
Desbotone	Sustrato	0,1173	0,2751	<0,0001	0,1693	0,6355
	Repetición	0,0087	0,8068	0,4539	0,6349	0,6729
	Recirculación	0,0909	0,9738	0,9091	0,7335	0,2346
	Sustrato*Recirculación	0,8666	0,3439	0,0253	0,9827	0,7161
	Repetición*Recirculación	0,8889	0,3064	0,0412	0,5716	0,4743
Segundo pico	Sustrato	0,1377	0,5834	0,0034	0,1685	0,2875
	Repetición	0,0180	0,8063	0,9559	0,0831	0,1734
	Recirculación	0,0472	0,9335	0,1497	0,4645	0,2314
	Sustrato*Recirculación	0,2128	0,2485	0,6928	0,8127	0,9833
	Repetición*Recirculación	0,5043	0,1222	0,6175	0,8541	0,7953

En negrilla se destacan los casos en que los tratamientos tuvieron un efecto significativo sobre las variables ($\alpha = 0,05$).

3.3.2 Composición del tejido vegetal

En las tablas 15 Y 16 se presentan los niveles promedio de microelementos hallados en el tejido de la planta entera de clavel, considerando todos los muestreos y separando las plantas según el tipo de sustrato o de recirculación. Fagueira *et al.* (2002) presentan intervalos de concentración de micronutrientes en plantas enteras y reportan como niveles superiores en el rango de suficiencia 20, 250, 300, 100 y 50 mg.kg⁻¹ de Cu, Fe, Mn, Zn y B, respectivamente. Considerando esos niveles, el zinc es el único elemento que se presentó en niveles altos en el 90% de las plantas de clavel analizadas. Al efectuar comparaciones entre los niveles de los cinco micronutrientes considerados, la mayoría de las plantas presentaron contenidos más altos de zinc, superado algunas veces por el hierro o el manganeso. El cobre fue el elemento hallado en concentraciones más bajas, del orden de 100 a 10 veces menos que los otros.

No se pueden comparar los resultados de la tabla 16 con otros análisis en clavel reportados en la literatura, ya que generalmente sólo se encuentra información de la concentración en las hojas (particularmente para el cuarto y quinto par). Por ejemplo, en tejido foliar de plantas ornamentales, Price (1986) reporta como excesivos, niveles mayores de 70, 1.000, 200 y 150 mg.kg⁻¹ de masa seca para Cu, Mn, Zn y B, respectivamente. Este mismo autor reporta como niveles deficientes menos de 30, 5, 30, 15 y 20 mg.kg⁻¹ de Fe, Cu, Mn, Zn y B en hojas. Los niveles críticos considerados como deficientes por Ortega (1997) son más altos, 50, 7, 100, 15 y 30 mg.kg⁻¹ de Fe, Cu, Mn, Zn y B en hojas.

Tabla 15. Estadística descriptiva de las concentraciones de los microelementos determinados en los tejidos de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.

Descriptor	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	mg.kg ⁻¹ de masa seca				
N	131	127	133	134	135
Mínimo	0,07	63,4	11,1	53	19,5
Máximo	13,52	262,7	232,3	358	173,6
Media	5,63	122,4	144,3	173,5	72,6
CV (%)	45,9	34,9	27,3	32,1	33,3

Tabla 16. Promedio de las concentraciones de los microelementos determinados en el tejido de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación.

Tratamiento	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	mg.kg ⁻¹ de masa seca				
35CAQ	5,67	123,3	109,15	169,2	72,3
65CAQ	5,77	116,9	146,6	179,65	74,69
100CAQ	5,2	121,9	170,78	163,92	67,58
0%R	5,77	128,7	138,19	176,52	73,45
50%R	5,47	117,1	152,13	171,2	71,23
100%R	5,78	124,4	145,5	176,55	74,77

Por otra parte, no se presentaron correlaciones significativas entre microelementos en la planta entera, es decir, no se halló evidencia del cambio en la concentración de alguno de los micronutrientes como consecuencia del cambio en la concentración de otro. Tampoco se presentó correlación entre los niveles de micronutrientes en el tejido vegetal y en los lixiviados, indicando que la toma de nutrientes no necesariamente está ligada con la concentración en las aguas de drenaje, tal vez por las diferencias existentes entre la solución nutritiva que entra en contacto con el sustrato al salir de los goteros y la solución salina que sale del sistema al colector de drenajes vía lixiviación.

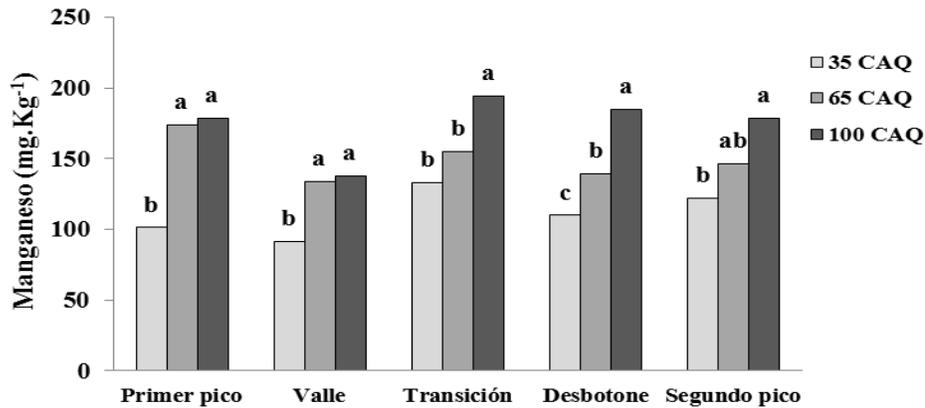
Existen para clavel algunos rangos en cuanto a relaciones iónicas en tejido foliar como diagnóstico nutricional, Ortega (1997) menciona para Fe/Mn, 0,5 - 1,3 como valor normal en la relación, y para Fe/Zn 0,5 - 4 como rango de valores sobre el cual se presentarían deficiencias o toxicidades. Los valores promedio encontrados para estas relaciones fueron 0,96 y 0,80 respectivamente, encontrándose en los rangos reportados, incluso en el 100% de los datos.

Como se observó en la ANAVA de microelementos determinados en tejido vegetal (tabla 14), la mezcla de sustratos utilizados tiene un efecto significativo sobre el contenido de manganeso, siendo ésta la única variable en el tejido afectada por las fuentes de variación del diseño.

En la figura 19 se pueden observar diferencias significativas entre los tratamientos para la concentración de manganeso en el tejido de la planta entera, en función de los contenidos de FC y de CAQ, así: 100CAQ es estadísticamente superior al tratamiento 35CAQ y el tratamiento 65CAQ tiende a mostrar valores intermedios.

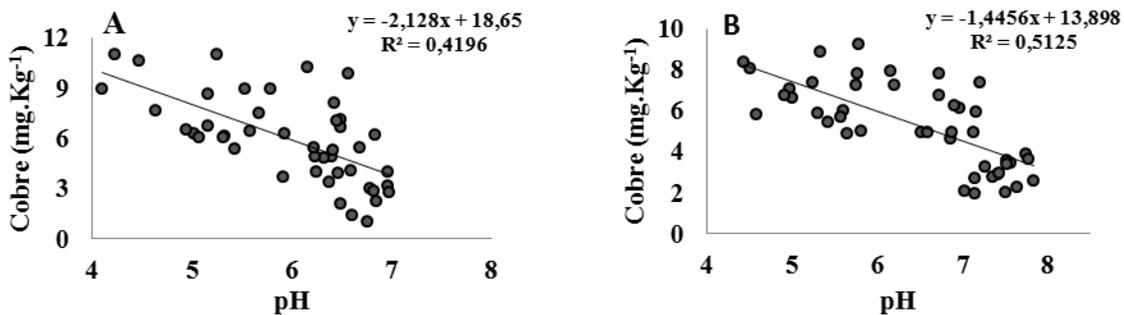
Figura 19. Variación del contenido de manganeso en el tejido en función de los sustratos utilizados en diferentes estadios fenológicos de plantas de clavel cv Delphi, crecidas en 0, 50 y 100%R.

Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



El pH en los lixiviados fue la única variable que mostró alguna influencia en la concentración de un microelemento en el tejido, teniendo para cobre correlaciones bajas ($r = 0,64$ y $r = 0,72$, respectivamente) esto en los sustratos con 65CAQ y 100CAQ (Figura 20).

Figura 20. Modelo de regresión lineal simple entre la concentración de cobre en el tejido y el pH en los lixiviados ($N = 45$), para clavel estándar cv Delphi cultivado en los sustratos 65CAQ (A) y 100CAQ (B) con 0, 50 y 100R.



Para los demás elementos, además de que no se presentan diferencias estadísticamente significativas por las fuentes de variación, no se observan comportamientos consistentes que ameriten su discusión, ellos son observados en los anexos.

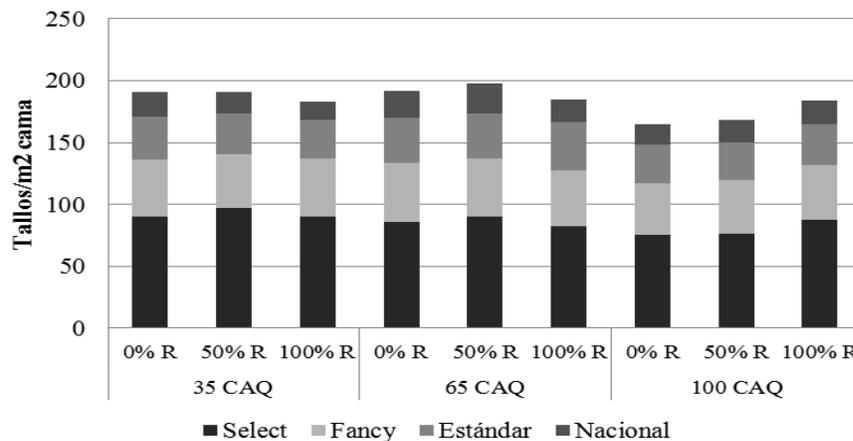
3.4 .Productividad y calidad

Los resultados que se discuten a continuación corresponden a la medición de productividad y calidad a segundo pico de producción (54 semanas después de siembra), luego de que los tratamientos evaluados han interactuado plenamente con el material sembrado. La productividad se expresa en tallos/m² - cama y los grados de calidad considerados fueron: 'select', 'fancy', estándar y nacional, de acuerdo a la norma estadounidense 'Standard Grades for Carnations' de la Society of American Florists and Ornamental Horticulturists (SAF, 1981).

3.4.1 Productividad

La productividad promedio para el segundo pico de producción fue de 184 tallos/m² - cama, con valores ligeramente mayores para el tratamiento 65CAQ con 50R y menores para el tratamiento con 100CAQ y 0R (figura 21). Los promedios por sustratos fueron mayores para 65CAQ, seguidos de 35 y 100 CAQ (192, 189 y 172 tallos/m² -cama respectivamente), en las recirculaciones (0, 50 y 100%) los promedios son prácticamente iguales (≈ 184 tallos/m² cama). Un aspecto a mencionar es que la productividad del segundo pico de producción respecto al primer pico disminuyó en promedio un 15%.

Figura 21. Cantidades y calidades de tallos por metro cuadrado-cama de clavel Delphi cultivado en tres sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco con 0, 50 y 100% de recirculación de drenajes, dados recolectados en el segundo pico de cosecha.



3.4.2. Calidad

En la tabla 17 se observa el efecto de las fuentes de variación sobre los grados de calidad evaluados; el grado *select* es influenciado por la mezcla de sustrato empleado y también por la interacción repetición - recirculación. En este grado de calidad, los tratamientos con 35CAQ presentan valores significativamente mayores sobre 100CAQ (figura 22). Las demás fuentes de variación no evidencian efecto sobre los demás parámetros de calidad evaluados, es decir, que por ejemplo el porcentaje de recirculación empleado no influyó en ninguno de los parámetros de calidad evaluados.

Tabla 17. Análisis de varianza de los parámetros de calidad de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en sustratos a base de cascarilla de arroz y fibra de coco, con tres porcentajes de recirculación, en evaluación realizada en segundo pico de cosecha.

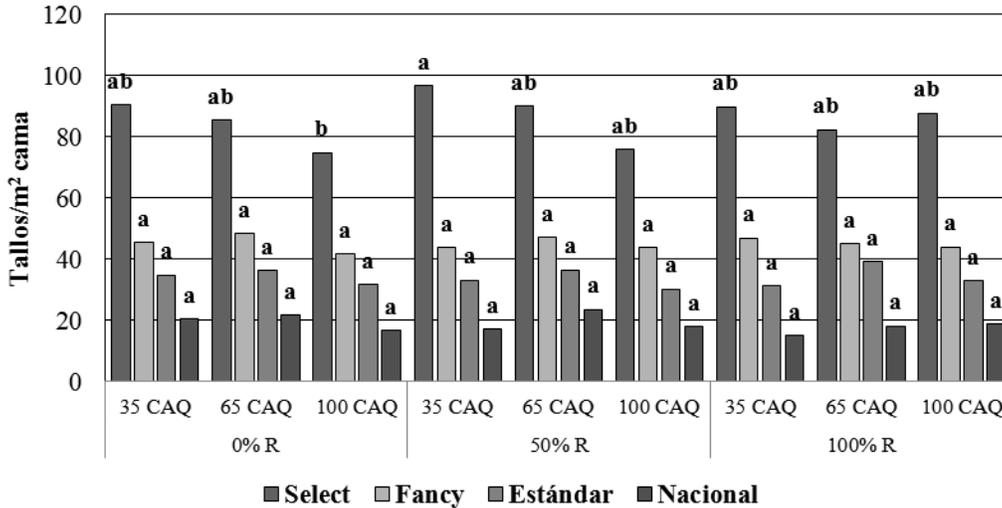
Fuente de variación	Select	Fancy	Estándar	Nacional
	Pr > F			
Sustrato	0,0072	0,0724	0,0586	0,1380
Repetición	0,1230	0,2568	0,0465	0,0499
recirculación	0,8999	0,9828	0,8421	0,4882
Sustrato*recirculación	0,1430	0,4216	0,7717	0,4001
Repetición*Recirculación	0,0027	0,0468	0,5096	0,4093

En negrilla se destacan los casos en que los tratamientos tuvieron un efecto significativo sobre las variables. ($\alpha = 0,05$).

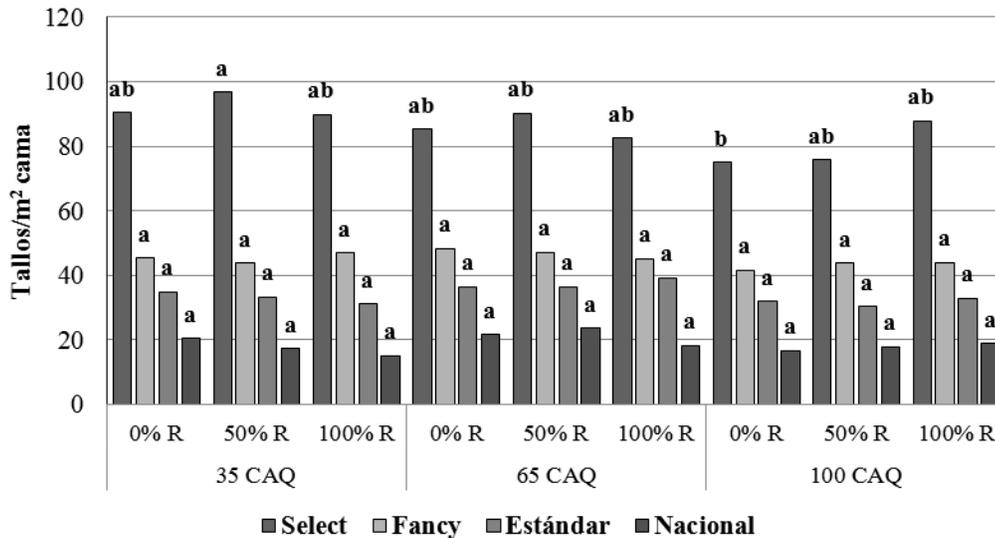
Al realizar las comparaciones múltiples entre grados de calidad, se observa que sólo en el grado *select* el sustrato 35CAQ con 50 % de recirculación es estadísticamente superior a 100CAQ con 0% recirculación. Para los demás grados de calidad, no se evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos. En la figura 22 se presenta los grados de calidad agrupados por tipo de recirculación y por tipo de sustrato, respectivamente.

Figura 22. Productividad a segundo pico de producción en función de la recirculación (A) y en función de los sustratos (B); en clavel variedad Delphi cultivado en tres sustratos a base de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco con 0, 50 y 100 % de recirculación.

A



B



Promedios seguidos de letra distinta indican diferencias según la prueba de t ($\alpha = 0,05$).

Para concluir si los rendimientos y las calidades presentadas se podían asociar con el estatus nutricional de las plantas de clavel, se observaron correlaciones y regresiones de CIC, pH, CE, Fe, Cu, Mn, Zn y B en sustrato, lixiviado y tejido de planta entera con el

registro de producción y los grados de calidad obtenidos, sin encontrar relaciones estadísticamente significantes ni comportamientos que ameriten su discusión. Fernández *et al.*, (2006) analizó los niveles foliares de nutrientes en clavel variedad Nelson y su relación con la producción, encontrando que incrementos en la productividad de clavel se correlacionan con niveles adecuados de calcio y boro, a partir de la etapa de “desbotone” y de manganeso desde el *pinch*. En el experimento de Savvas y Gizas (2002), el manganeso fue el único elemento que mostro una fuerte relación entre su concentración en tejido y el rendimiento floral en un cultivo de rosas. En el presente estudio ninguna de las correlaciones descritas fueron encontradas.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con base en los resultados del presente estudio, durante el periodo de seguimiento del cultivo, desde el *primer* hasta el *segundo pico de cosecha*, se puede concluir que:

1. No hay acumulación significativa de microelementos en los lixiviados colectados, en la mayoría de los casos se presentan niveles inferiores al de la solución nutriente aplicada, y para elementos Fe, Mn, Zn y B la concentración es inferior a los límites considerados máximos para aguas de riego. Para algunos estadios el incremento en el porcentaje de recirculación aumenta de forma significativa la cantidad de cobre y de zinc determinada en el lixiviado. Para manganeso, los mayores contenidos provenientes de los tratamientos con cascarilla de arroz quemada se expresan en aumento de este elemento en el lixiviado. De forma contrastante, a pesar de que los sustratos con cascarilla de arroz presentan los menores contenidos de hierro, bajo estos tratamientos son mayores los niveles de hierro en el lixiviado. Se evidencia también, que estas liberaciones están influenciadas por el pH del lixiviado.
2. El porcentaje de recirculación empleada no afecta la composición del sustrato, sino que éste por sus características intrínsecas es quien determina su propio comportamiento químico. Los elementos cobre, hierro y manganeso se acumularon en el sustrato, guardando relación este aumento con el mayor o menor contenido inicial del elemento en el sustrato original.
 1. El bajo número de diferencias estadísticas entre las concentraciones de los microelementos en tejido como resultado de los tratamientos empleados, permite afirmar que las concentraciones siempre fueron aptas para el normal desarrollo del cultivo. A pesar de la alta variabilidad en el lixiviado, se constató que el

manganeso liberado desde los sustratos con cascarilla de arroz es absorbido por las plantas del cultivo de clavel, y sus contenidos están dentro de los rangos considerados adecuados.

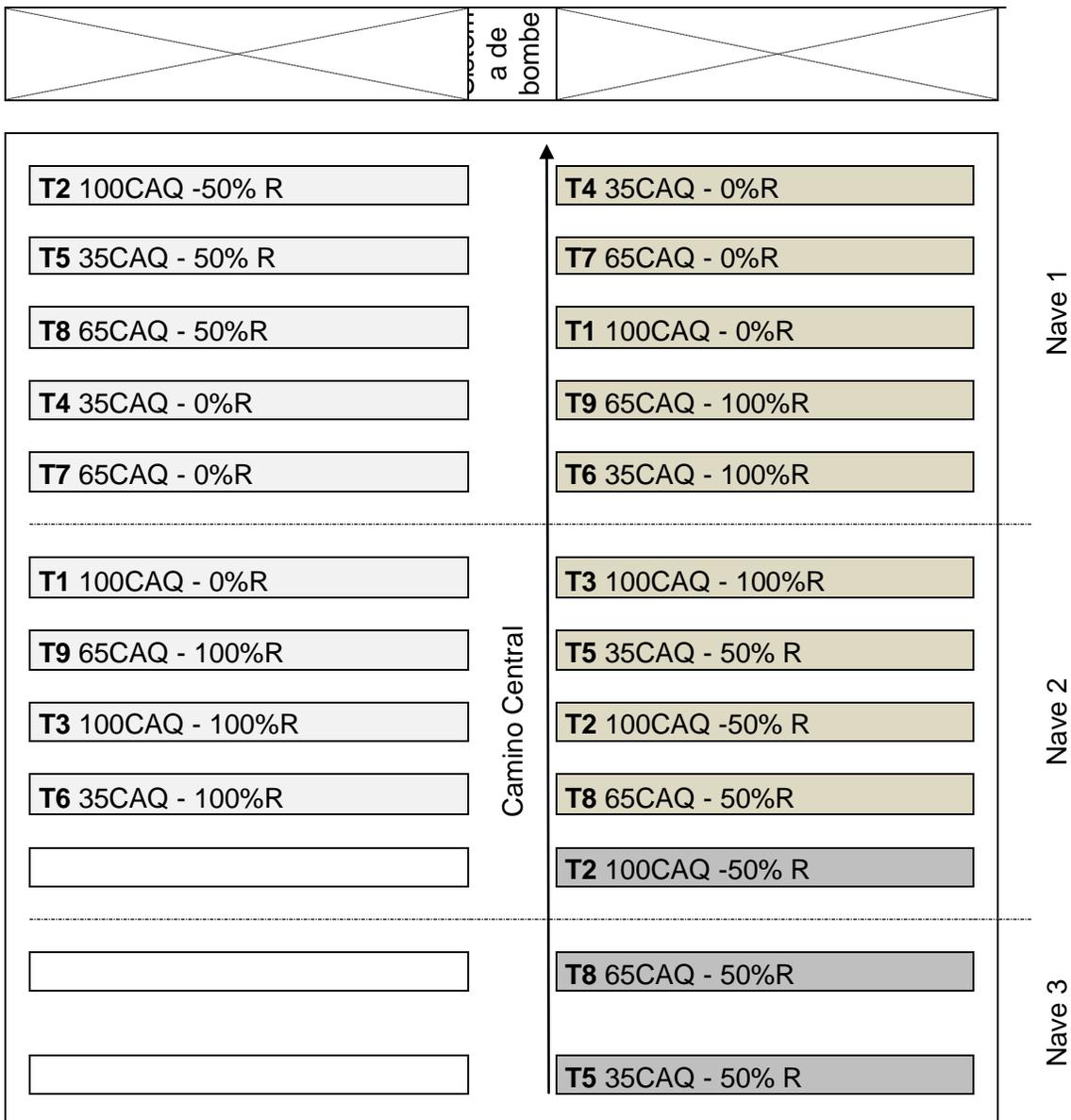
Los resultados de este estudio muestran que el comportamiento de los microelementos Cu, Fe, Mn, Zn y B es muy variable y difícil de predecir en los tres componentes analizados (lixiviados, sustratos y tejido vegetal).

4.2 Recomendaciones

Dados los valores anormalmente altos de CE medidos en los sustratos por el método de la pasta saturada, se recomienda revisar la viabilidad de emplear este método en sustratos orgánicos, considerando que este es un método validado para suelos minerales.

Anexos:

Anexo A. Diseño experimental de bloques completos al azar usado en el módulo de invernadero destinado al cultivo de clavel, donde 0, 50 y 100% de recirculación fueron las parcelas principales y 100CAQ, 65CAQ y 35 CAQ las subparcelas.



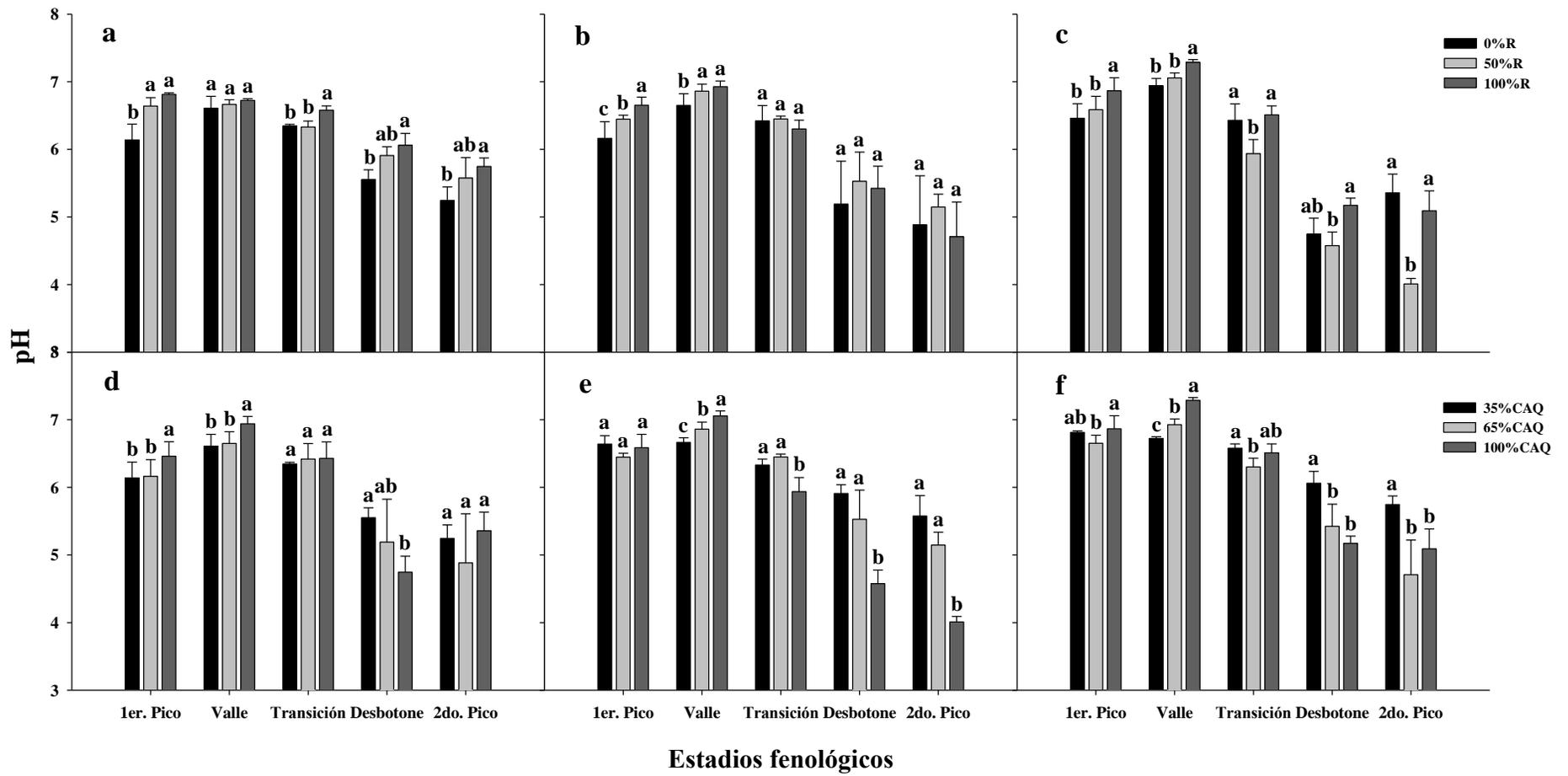
	T9 65CAQ - 100%R	Nave 4	
	T3 100CAQ - 100%R		
	T6 35CAQ - 100%R		
	T7 65CAQ - 0%R		
	T1 100CAQ - 0%R		
	T4 35CAQ - 0%R		
Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	

100CAQ =100% de cascarilla de arroz quemada; 65CAQ = 65% cascarilla de quemada: 35% de fibra de coco, y 35 CAQ = 35% de cascarilla de arroz quemada: 65% de fibra de coco.

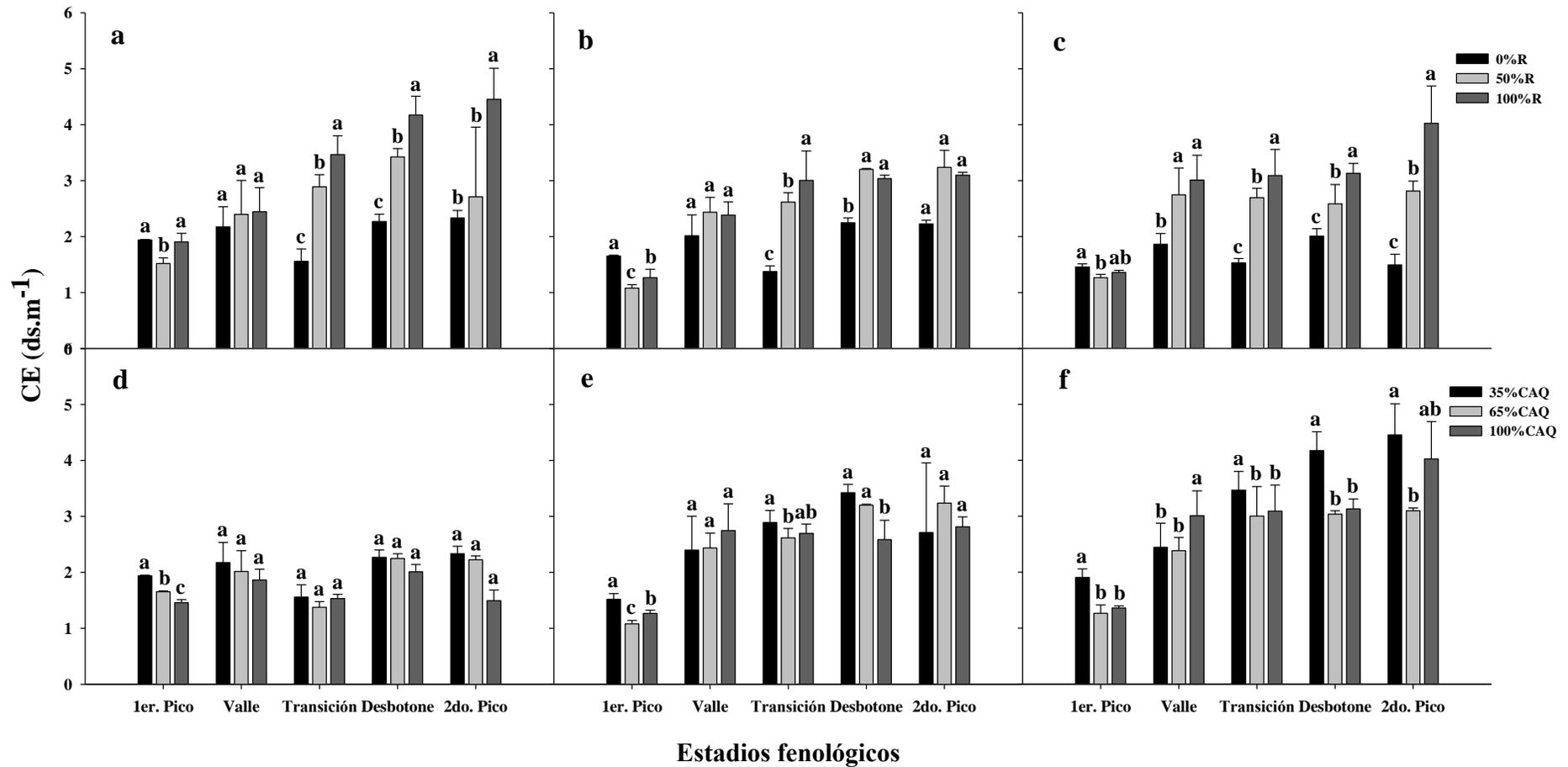
B Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido

Anexo 2. Variación en el comportamiento de: pH, CE, Fe, Mn, Cu, Zn y B en los lixiviados; CIC, pH, CE, Fe, Mn, Cu, Zn y B en los sustratos; y Fe, Mn, Cu, Zn y B en el tejido vegetal de un cultivo clavel estándar cv Delphi, presentado en función de los porcentajes de recirculación (0, 50 y 100%R) y los sustratos evaluados (35, 65 y 100CAQ), determinados en distintos estadios fenológicos.

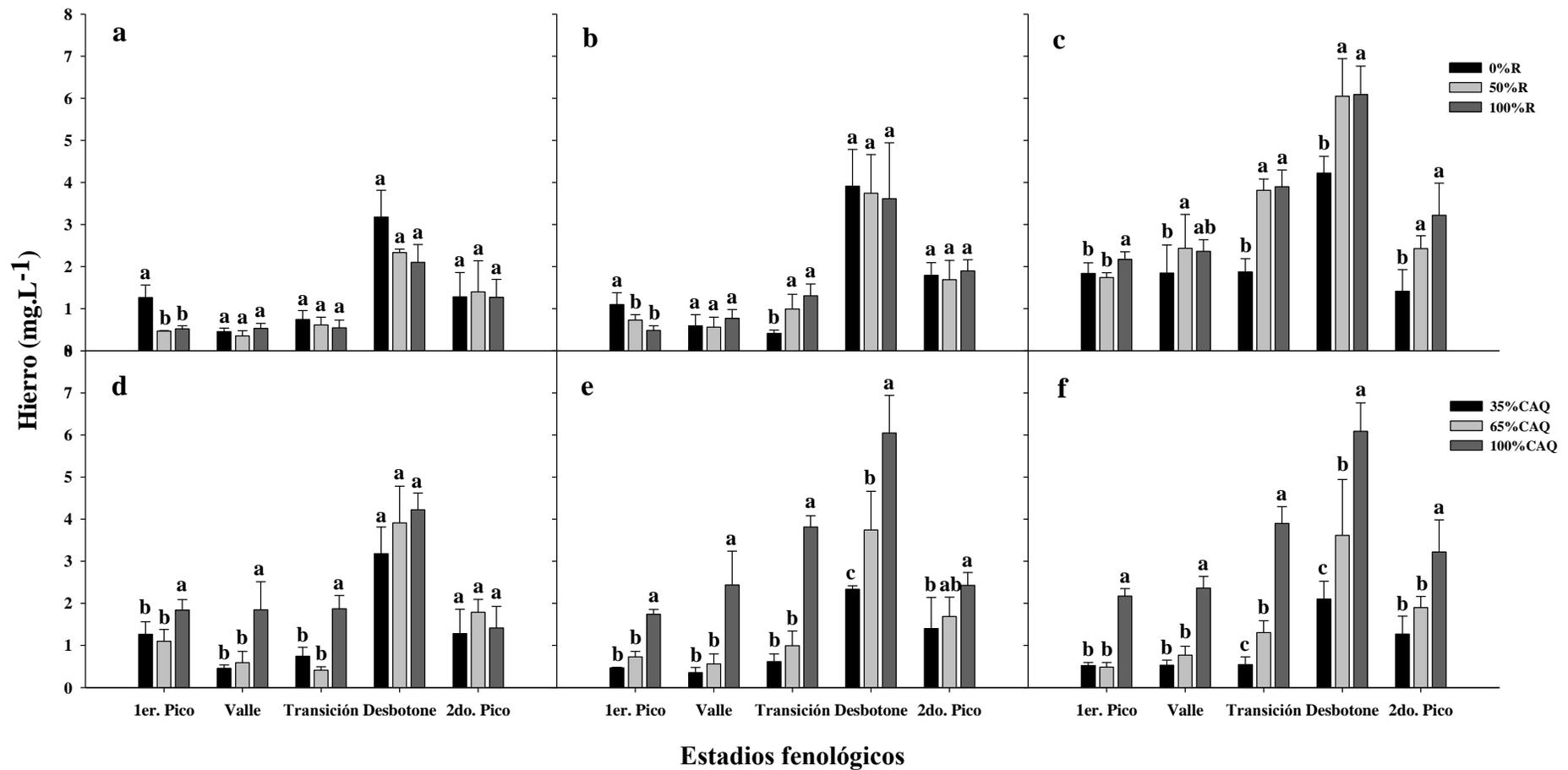
A. Variación del pH en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



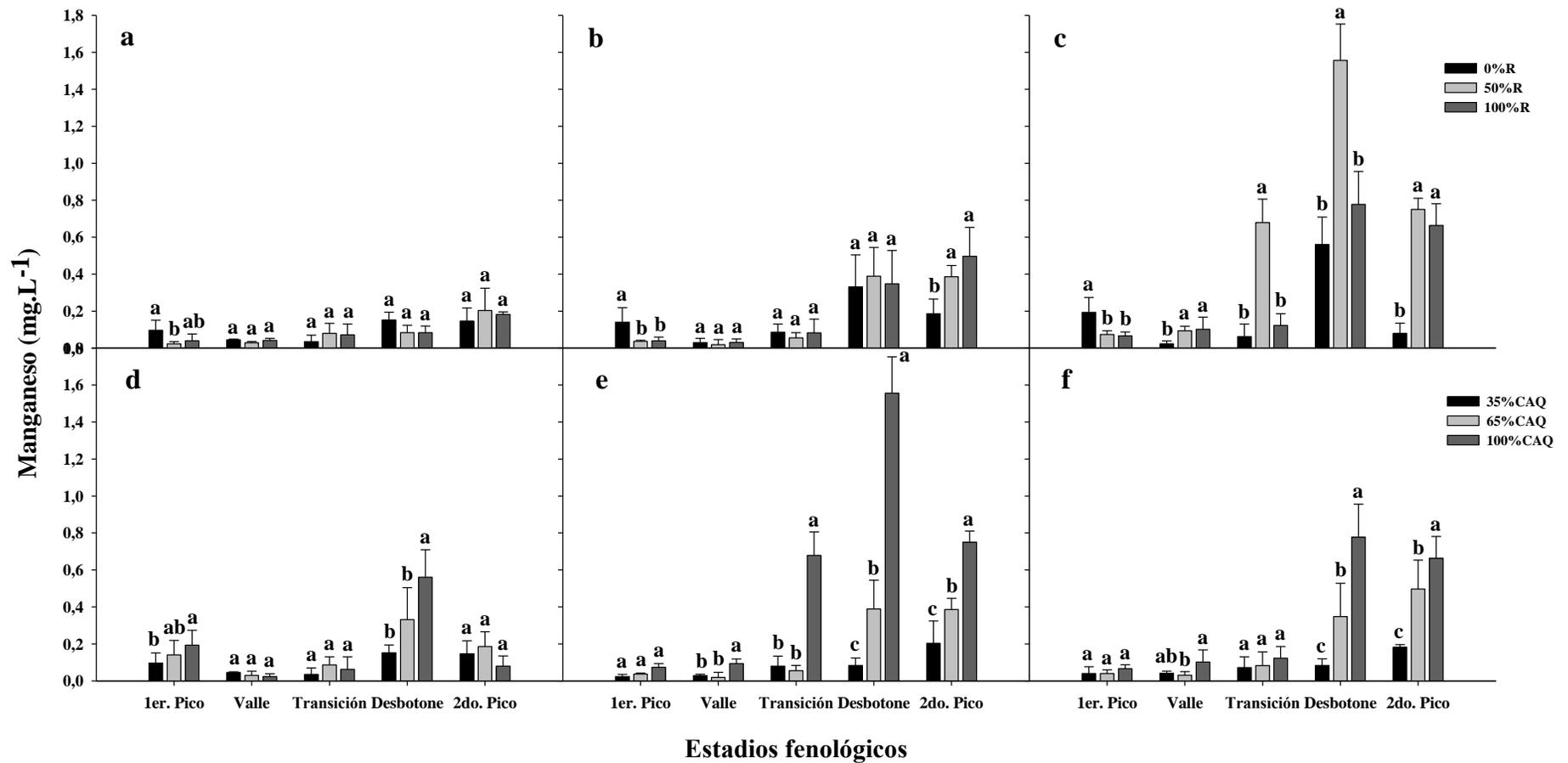
B. Variación del contenido de CE en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



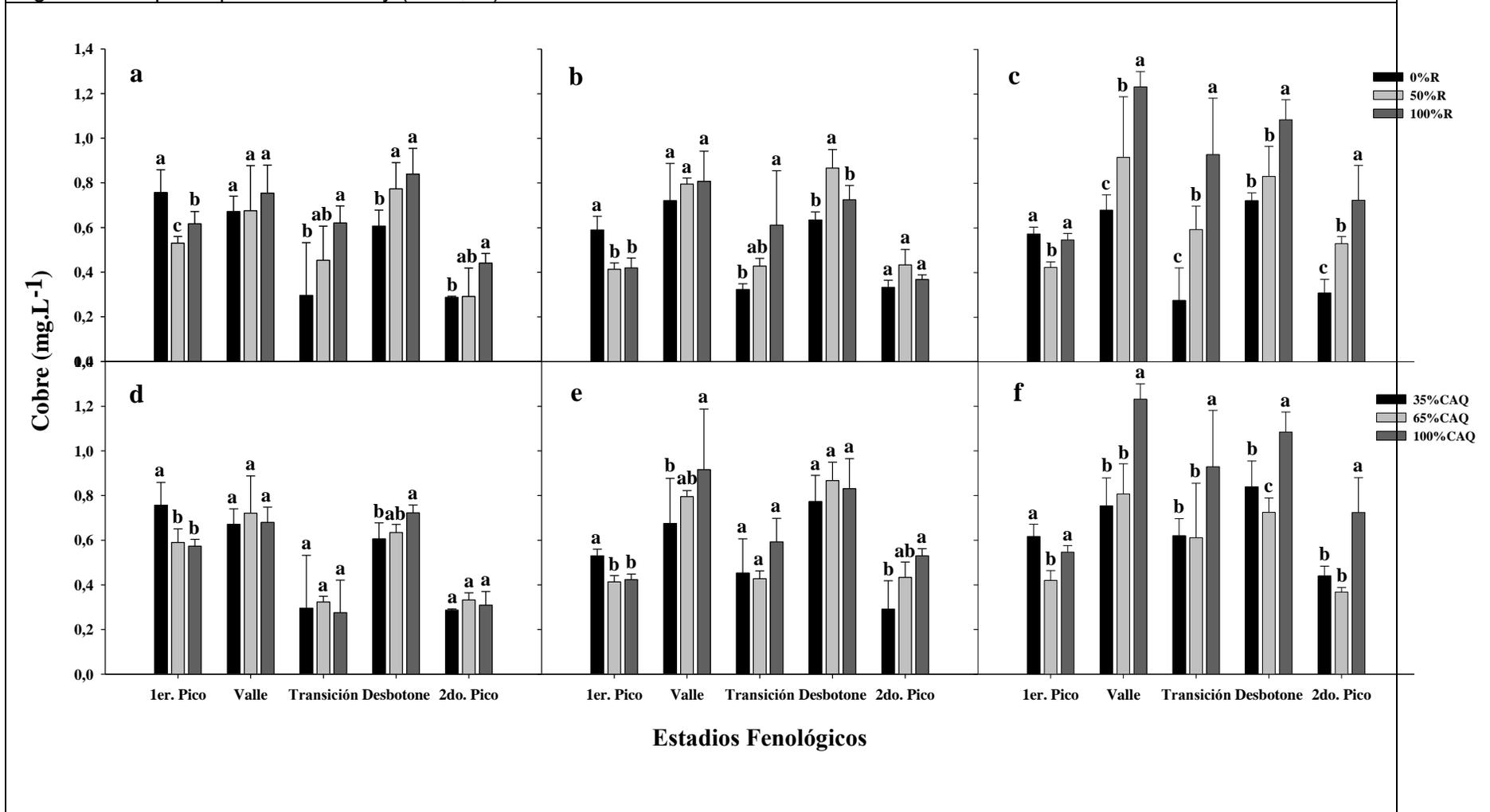
C. Variación del contenido de Fe en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



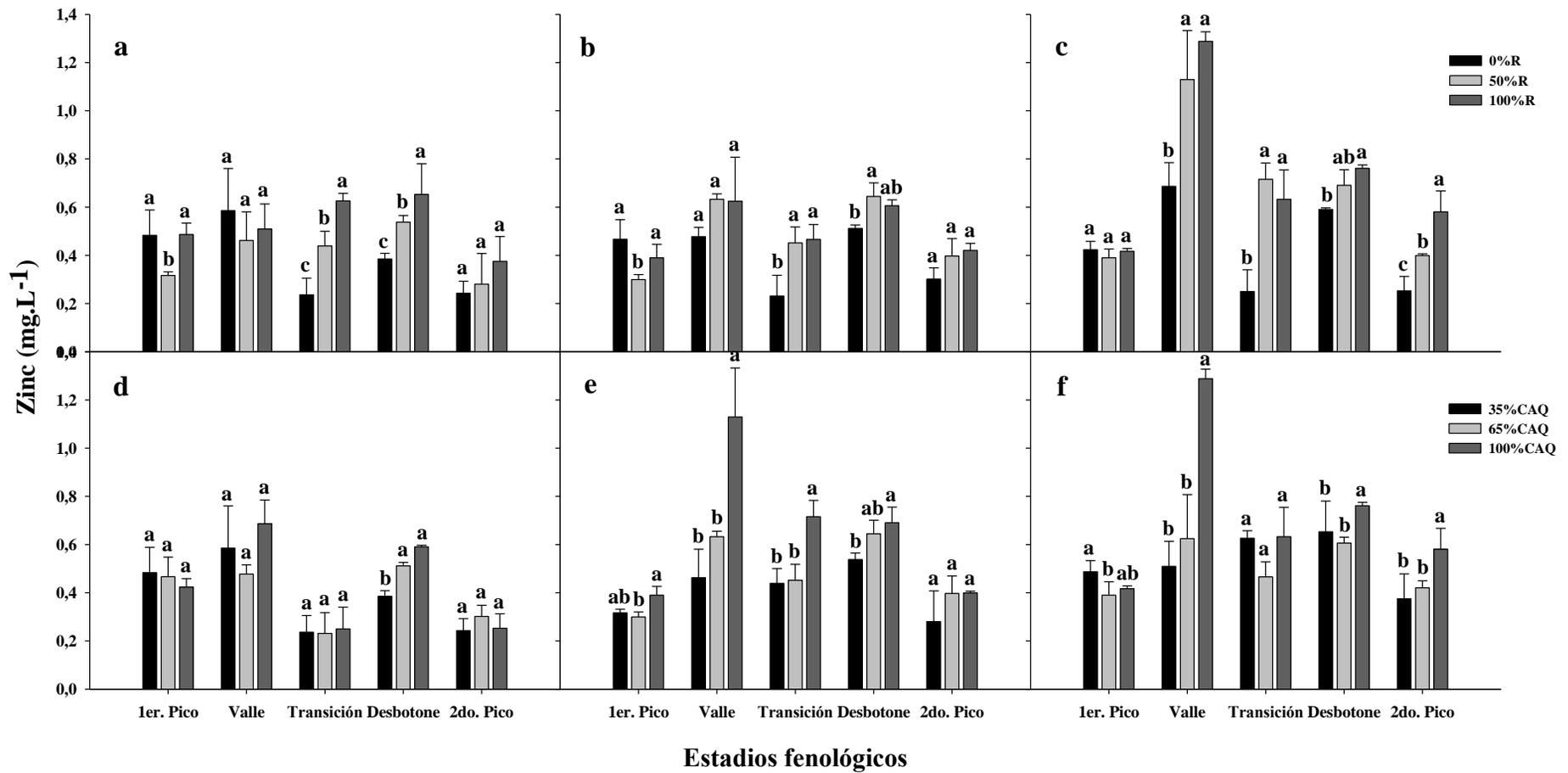
D. Variación del contenido de Mn en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 6; CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por de Tukey ($\alpha = 0,01$).



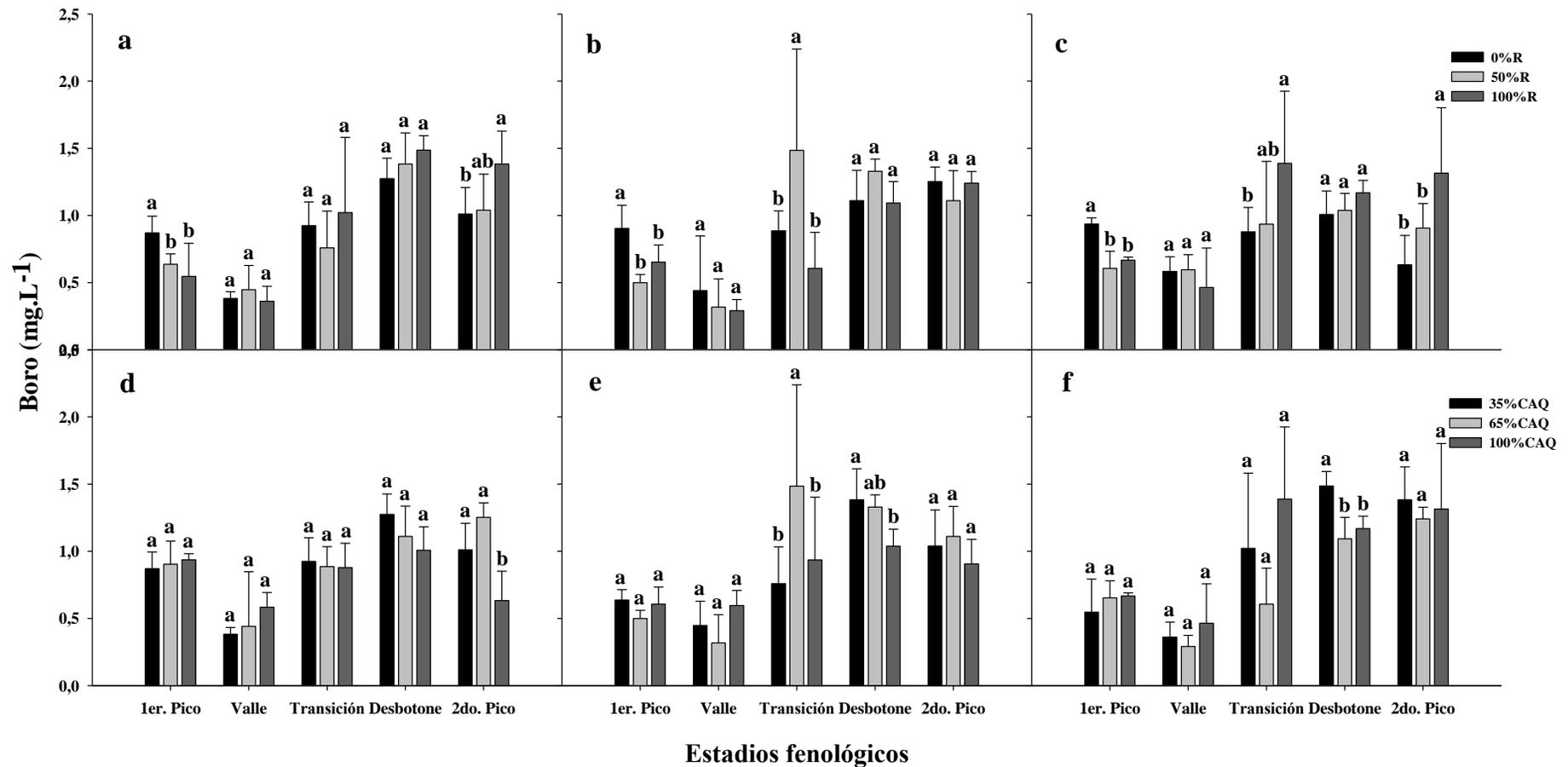
E. Variación del contenido de Cu en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



F. Variación del contenido de Zn en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).

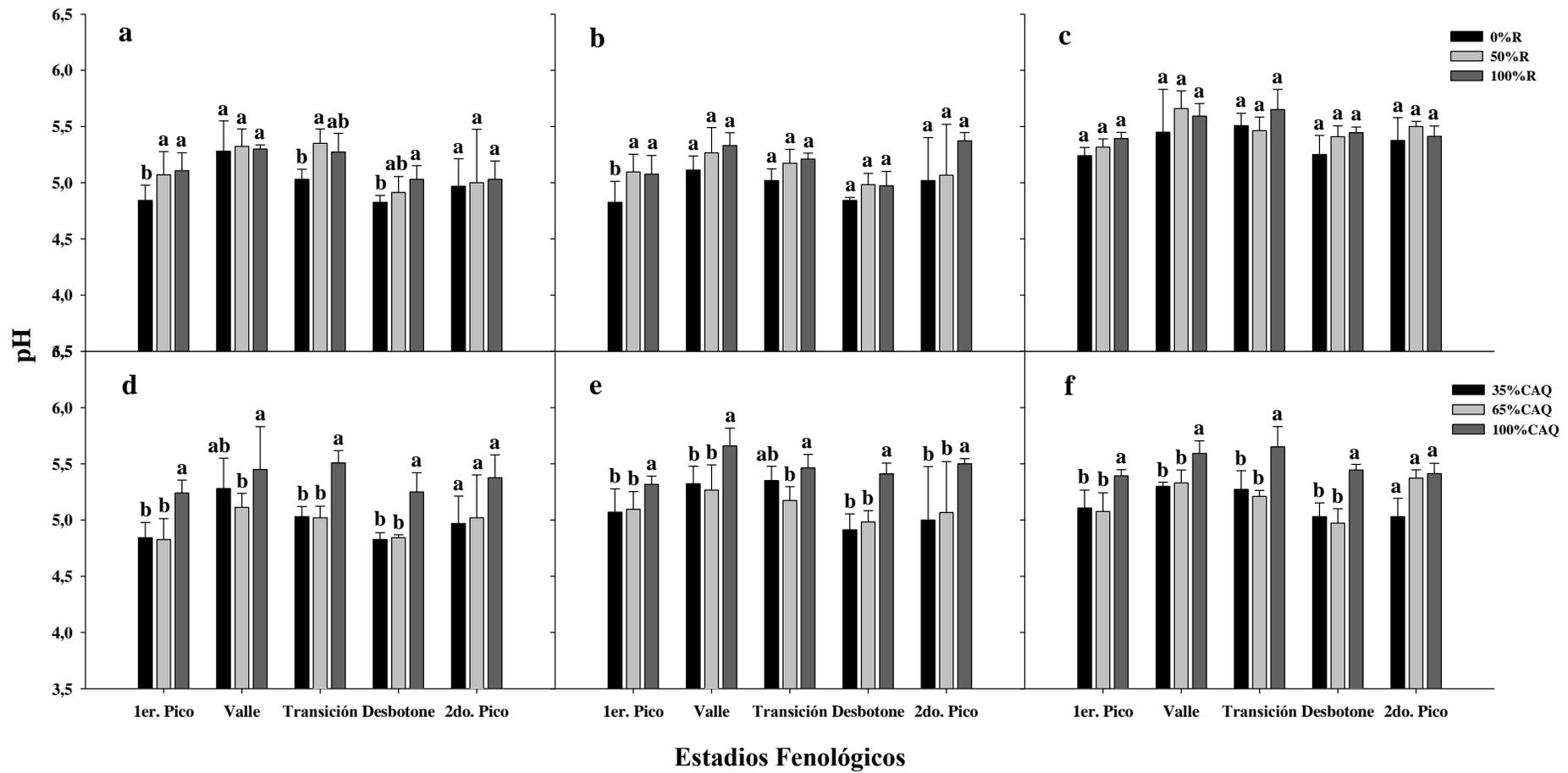


G. Variación del contenido de B en los lixiviados a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).

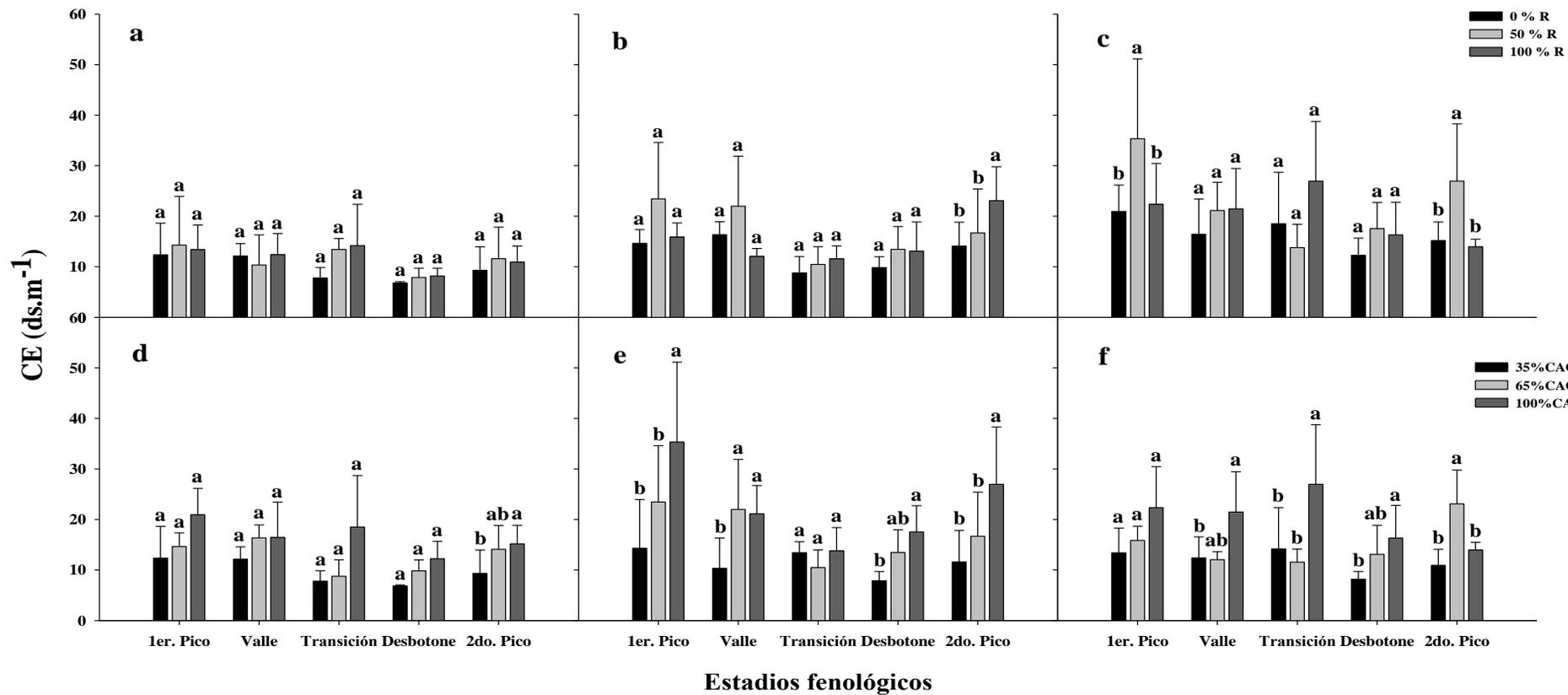


H. Variación del pH en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100

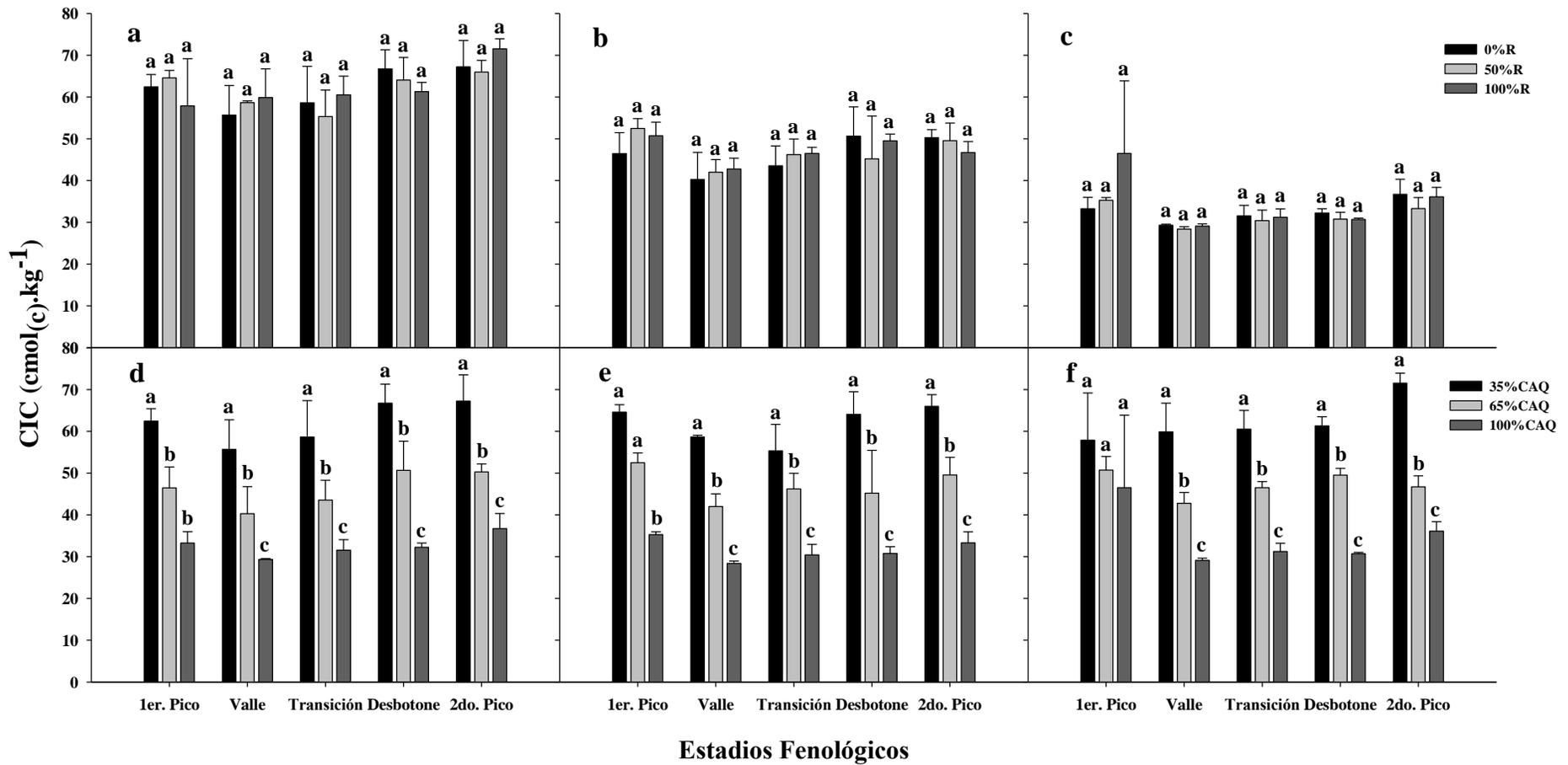
CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



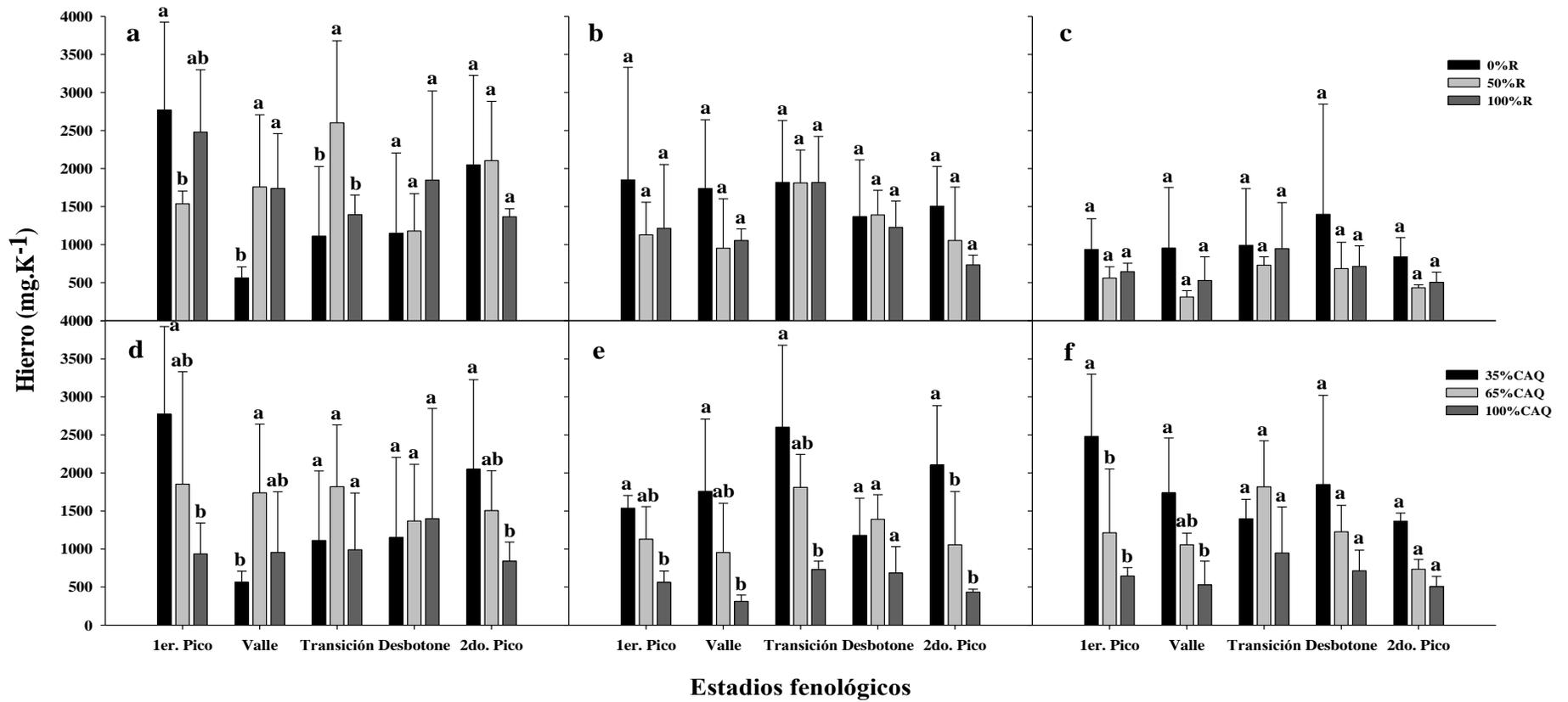
I. Variación del contenido de CE en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



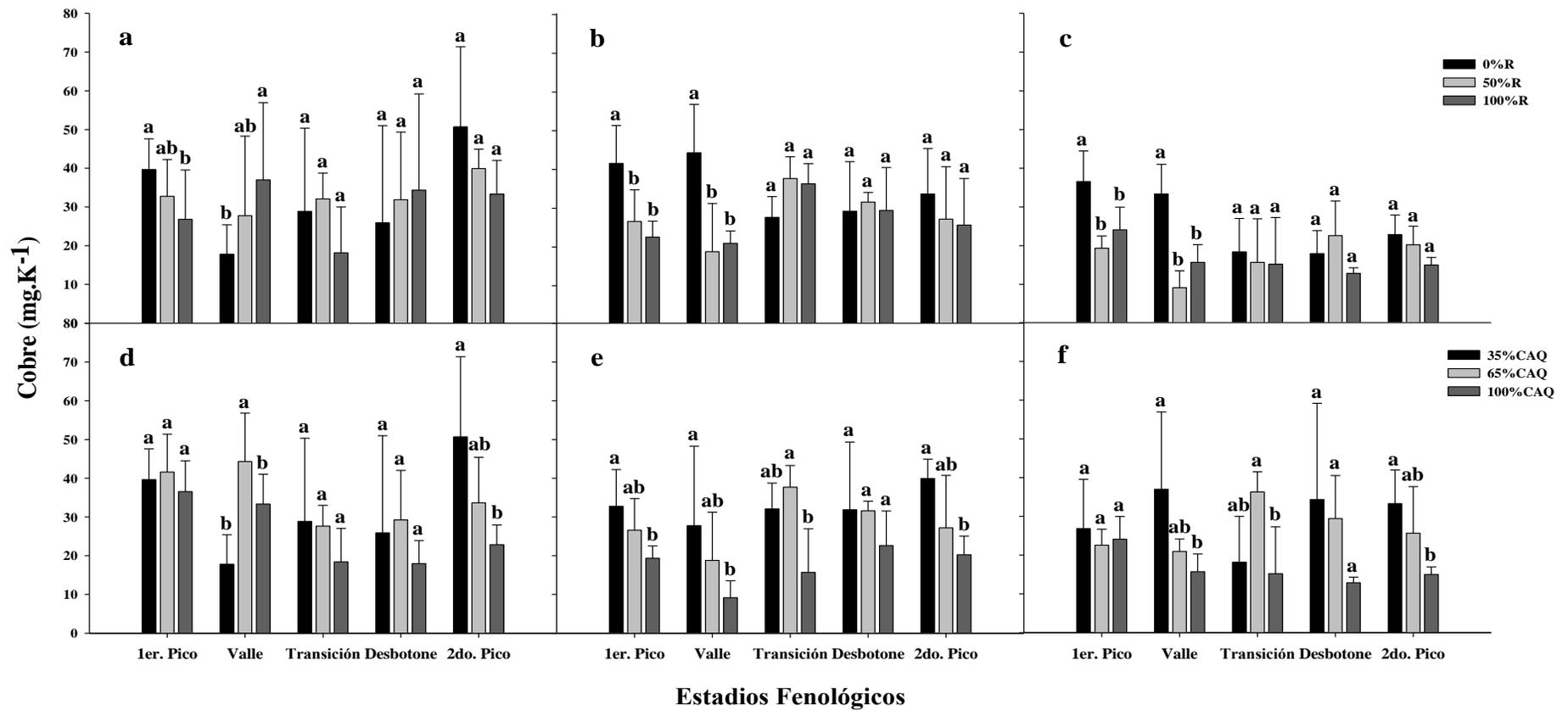
J. Variación de la CIC en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



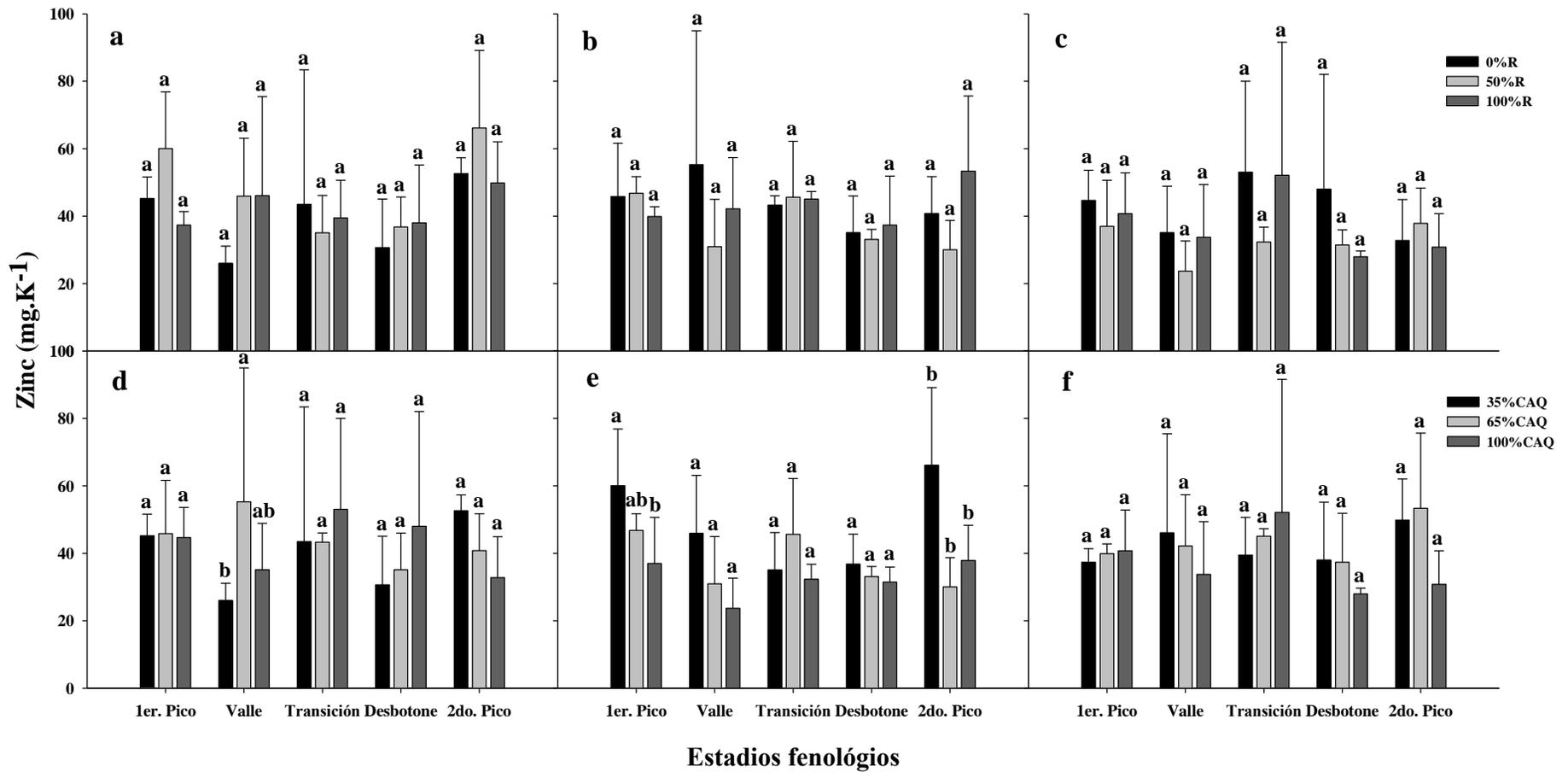
K. Variación del contenido de Fe en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



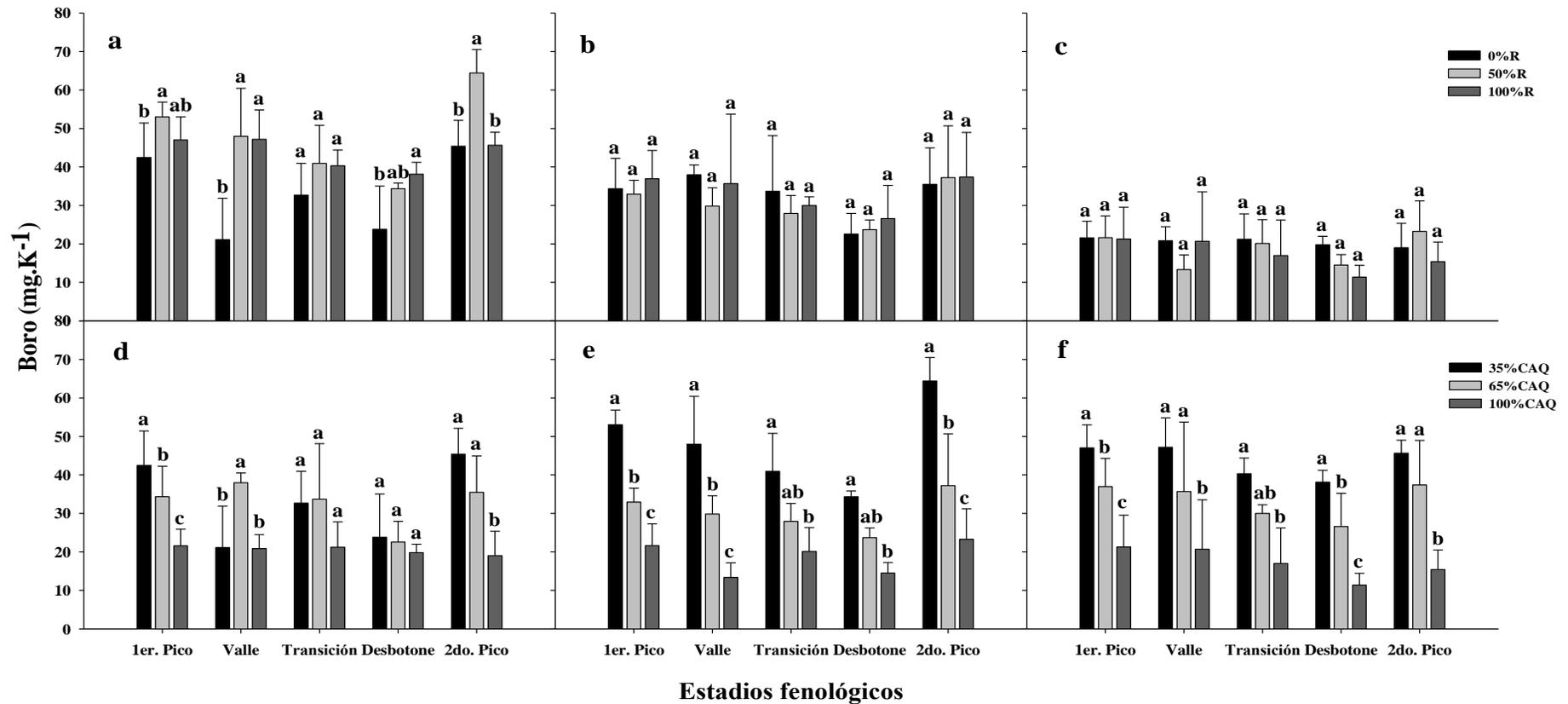
M. Variación del contenido de Cu en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



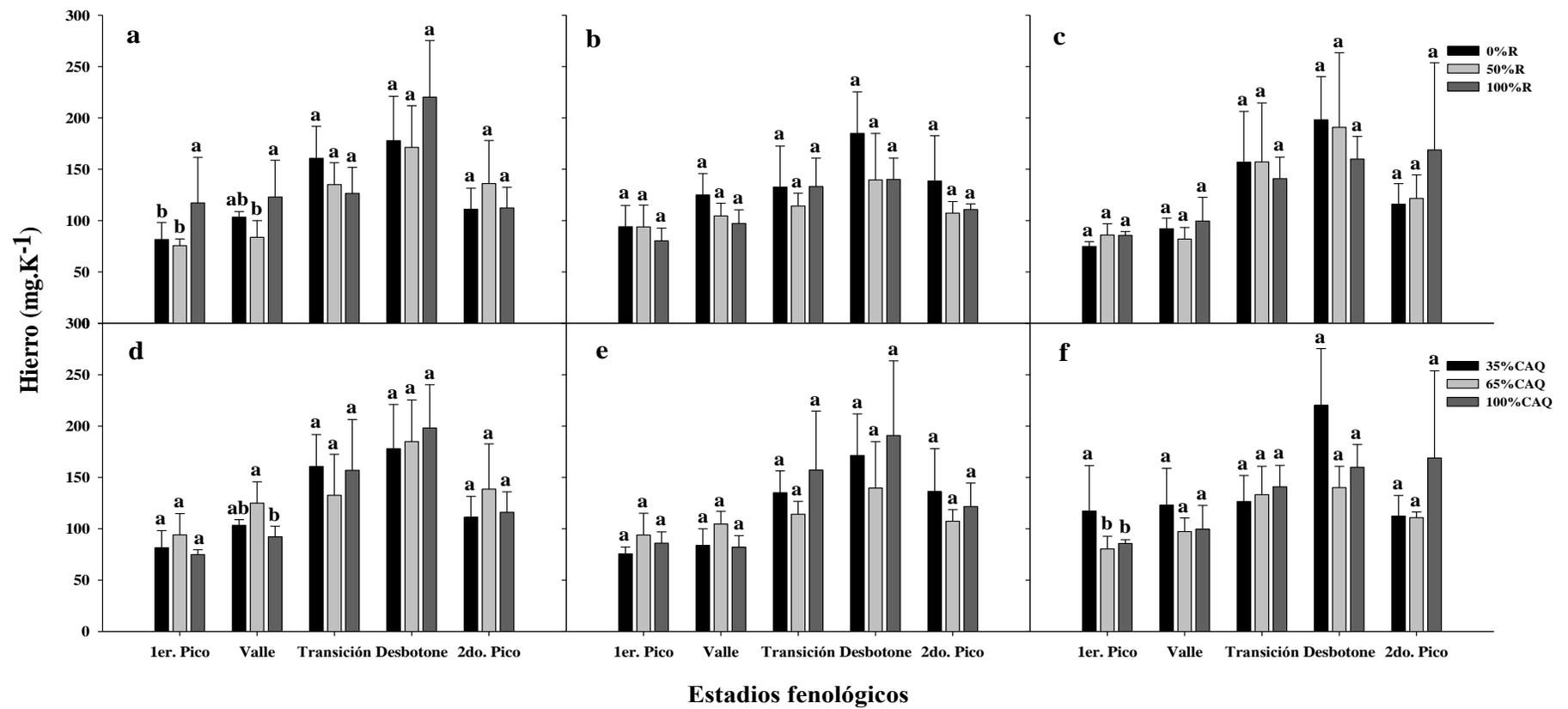
N. Variación del contenido de Zn en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



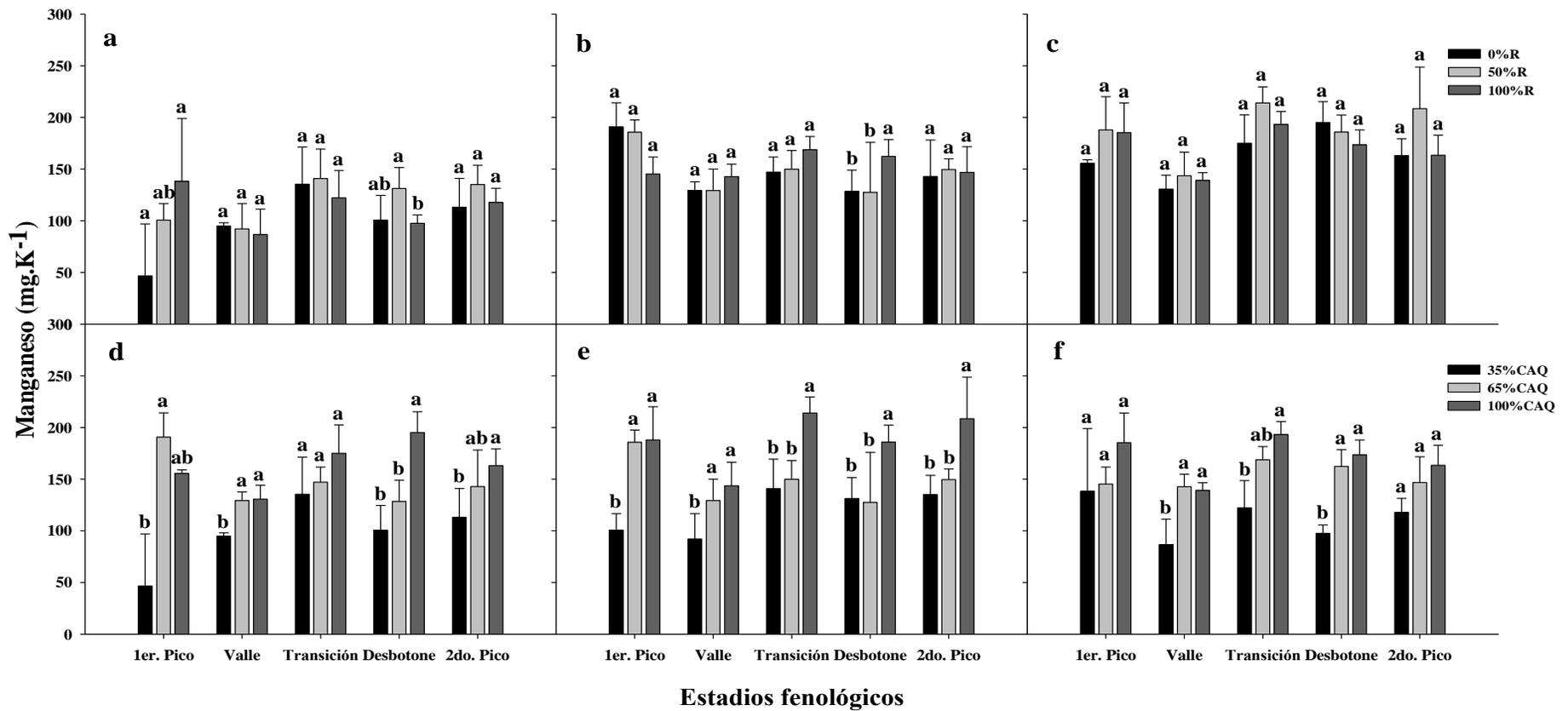
O. Variación del contenido de B en los sustratos a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



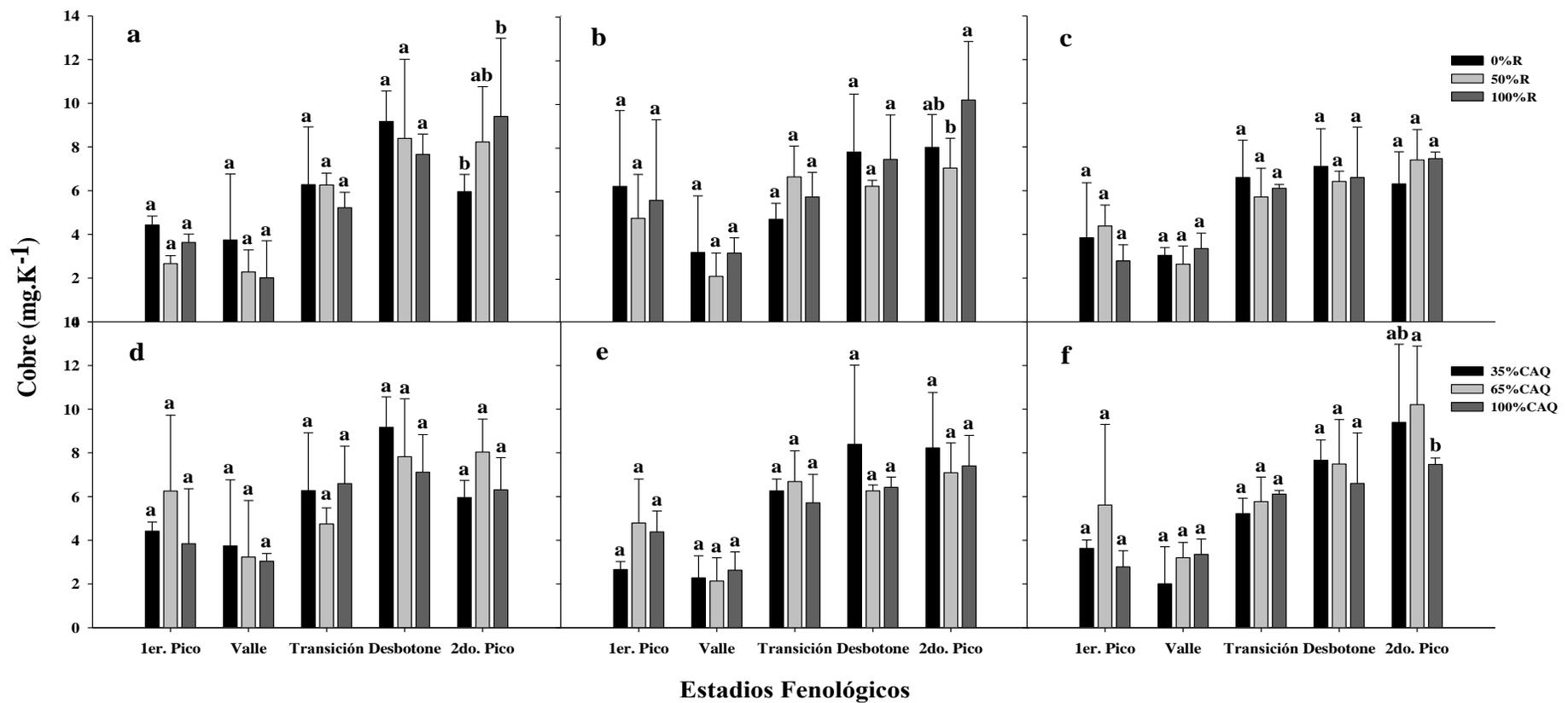
P. Variación del contenido de Fe en el tejido a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



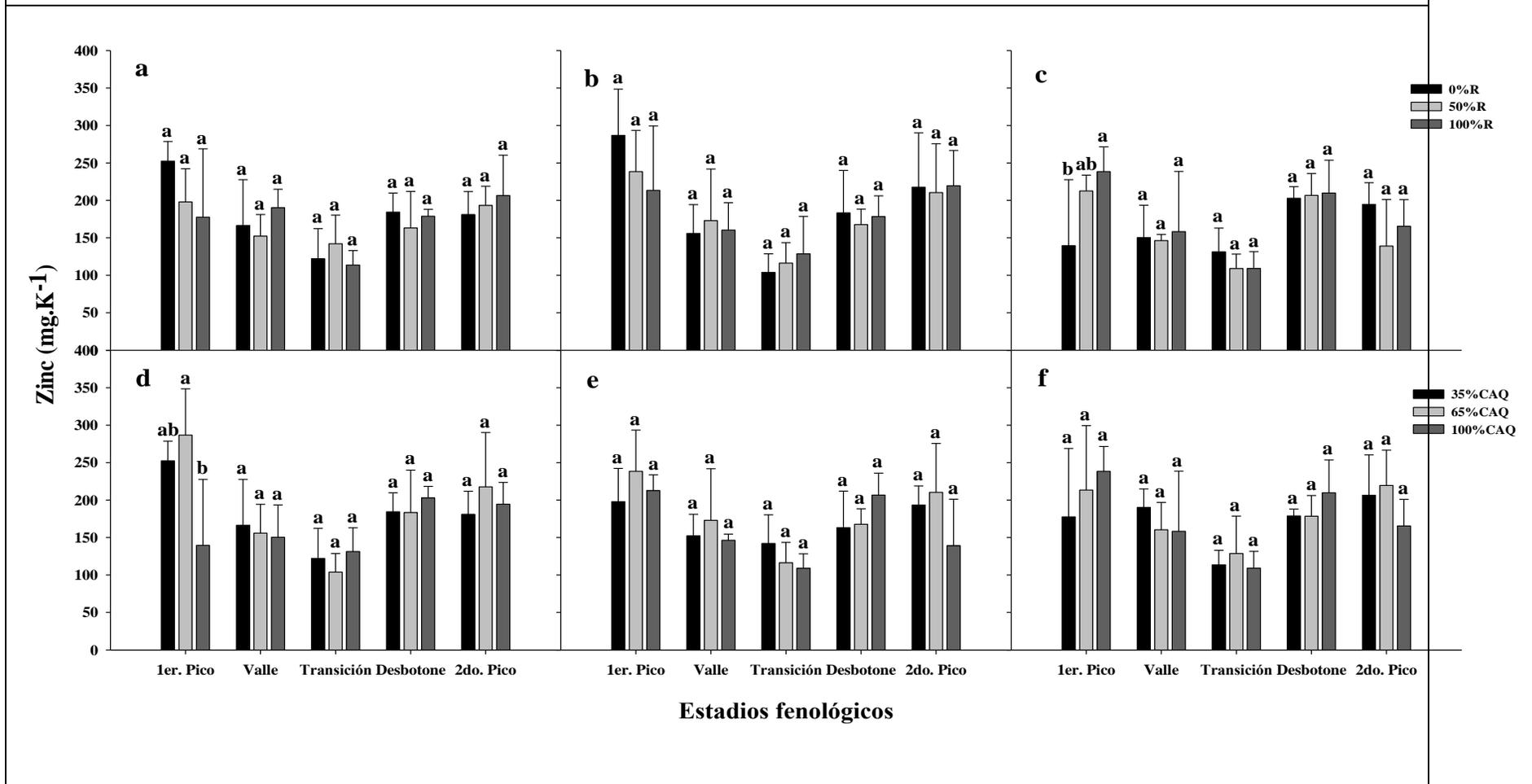
Q. Variación del contenido de Mn en el tejido a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



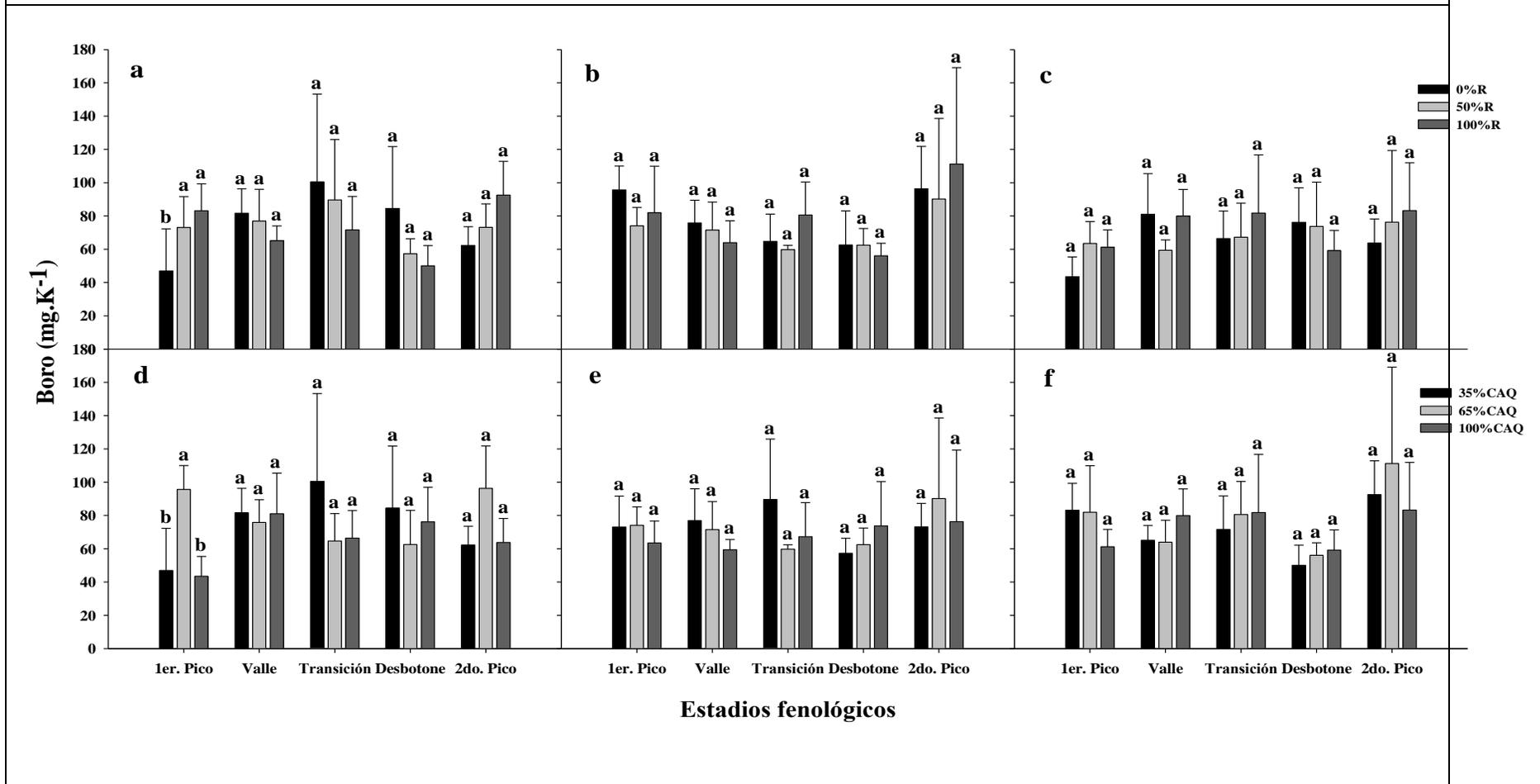
R. Variación del contenido de Cu en el tejido a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



S. Variación del contenido de Zn en el tejido a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



T. Variación del contenido de B en el tejido a través de cinco estadios fenológicos, evaluados por tipo de sustrato (a: 35; b: 65; c: 100 CAQ) y por porcentaje de recirculación (d: 0 %; e: 50 %; f: % 100 recirculación). Letras distintas indican diferencias significativas por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).



Anexo 3. Pruebas de Normalidad (Shapiro-Wilk) para concentraciones de elementos en sustratos, lixiviados y tejidos de plantas de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R

FASE	ESTADIO	VARIABLE							
		CIC	pH	CE	Cu	Fe	Mn	Zn	B
Lixiviado	Primer pico		0,5381	0,7461	0,7382	0,1074	0,0191	0,0034	0,3512
	Valle		0,6786	0,6963	0,7647	0,9194	0,4712	0,4278	0,9496
	Transición fase								
	vegetativa a reproductiva		0,1147	0,8190	0,0412	0,5552	0,5203	0,6653	0,1928
	Desbotone		0,7442	0,6013	0,7965	0,7404	0,6673	0,7432	0,9564
	Segundo pico		0,5034	0,0832	0,9875	0,2379	0,3416	0,7364	0,2599
Sustrato	Primer pico	0,7000	0,4518	0,7834	0,1162	0,6573	0,9278	0,6781	0,1055
	Valle	0,7332	0,2383	0,8394	0,0854	0,3353	0,5184	0,5779	0,3896
	Transición fase								
	vegetativa a reproductiva	0,7247	0,4135	0,8448	0,4766	0,4518	0,6711	0,4938	0,0357
	Desbotone	0,6468	0,6854	0,9863	0,1298	0,6521	0,2941	0,6624	0,5360
	Segundo pico	0,9857	0,4623	0,4493	0,1890	0,4993	0,2512	0,7969	0,7324
Tejido	Primer pico				0,7174	0,8187	0,6297	0,4703	0,1685
	Valle				0,6583	0,8427	0,8657	0,1535	0,3529
	Transición fase								
	vegetativa a reproductiva				0,0365	0,1064	0,6391	0,3750	0,3795
	Desbotone				0,6520	0,1440	0,9564	0,5198	0,6981
	Segundo pico				0,9537	0,9687	0,6092	0,0907	0,5705

100CAQ = 100% de cascarilla de arroz quemada; 65CAQ = 65% cascarilla de arroz quemada - 35% fibra de coco; 35CAQ = 35% cascarilla de arroz quemada - 65% fibra de coco. 0R = 0% de los lixiviados son recirculados; 50R = 50% de los lixiviados son reirculados; 100R = 100% de los lixiviados son recirculados.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) realizada sobre residuales de cada variable, significativa al 95% ($P > 0,05$).

Anexo 4. Pruebas de Normalidad (Shapiro-Wilk) para grados de calidad de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R

Estadio	Grados de calidad			
	Select	Fancy	Estándar	Nacional
Primer Pico	0,206	0,1689	0,333	0,8537
Segundo Pico	0,7926	0,7841	0,9455	0,5209

100CAQ = 100% de cascarilla de arroz quemada; 65CAQ = 65% cascarilla de arroz quemada - 35% fibra de coco; 35CAQ = 35% cascarilla de arroz quemada - 65% fibra de coco. 0R = 0% de los lixiviados son recirculados; 50R = 50% de los lixiviados son reirculados; 100R = 100% de los lixiviados son recirculados.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) realizada sobre residuales de cada variable, significativa al 95% ($P > 0,05$).

Anexo 5. Matriz de correlación para concentraciones de elementos en sustratos, lixiviados y tejidos de plantas de clavel estándar cv. Delphi, cultivado en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ con 0R, 50R y 100R

Fase	Variable	Lixiviados							Tejido					Sustrato							
		PH	B	CU	FE	MN	ZN	CE	CU	FE	MN	ZN	B	CU	FE	MN	ZN	B	PH	CE	CIC
Lixiviados	PH	1,000																			
	B	-0,482	1,000																		
	CU	0,172	-0,025	1,000																	
	FE	-0,541	0,423	0,432	1,000																
	MN	-0,714	0,300	0,196	0,755	1,000															
	ZN	0,187	-0,074	0,825	0,395	0,208	1,000														
	CE	-0,298	0,490	0,418	0,310	0,287	0,403	1,000													
Tejido	CU	-0,594	0,569	-0,254	0,275	0,301	-0,182	0,350	1,000												
	FE	-0,397	0,458	0,069	0,457	0,319	-0,007	0,322	0,357	1,000											
	MN	-0,266	0,075	-0,038	0,404	0,388	0,045	-0,099	0,131	0,161	1,000										
	ZN	-0,194	-0,082	-0,016	0,061	0,096	-0,133	-0,115	0,026	-0,087	0,037	1,000									
	B	-0,127	-0,029	-0,136	-0,089	0,023	-0,124	0,090	0,143	0,078	0,208	0,284	1,000								
Sustratos	CU	-0,003	0,030	-0,236	-0,282	-0,185	-0,303	-0,073	0,061	-0,180	-0,293	0,016	-0,017	1,000							
	FE	0,113	0,001	-0,169	-0,327	-0,255	-0,253	-0,070	0,022	-0,155	-0,378	-0,054	-0,106	0,698	1,000						
	MN	-0,031	0,069	0,121	0,247	0,075	0,171	0,127	0,120	0,119	0,088	-0,303	-0,053	0,129	0,022	1,000					
	ZN	0,030	0,035	-0,228	-0,166	-0,107	-0,267	-0,085	0,002	-0,131	-0,081	-0,015	0,000	0,540	0,412	0,189	1,000				
	B	0,122	-0,044	-0,288	-0,527	-0,347	-0,402	0,029	-0,039	-0,130	-0,378	0,081	0,121	0,394	0,457	-0,317	0,368	1,000			
	PH	0,171	-0,191	0,239	0,172	0,150	0,338	0,047	-0,252	-0,148	0,268	-0,312	-0,024	-0,421	-0,351	0,100	-0,099	-0,329	1,000		
	CE	0,074	-0,171	0,144	0,123	0,064	0,112	-0,101	-0,219	-0,230	0,370	0,216	0,077	-0,322	-0,355	-0,227	-0,049	-0,143	0,444	1,000	
CIC	0,020	0,133	-0,290	-0,441	-0,354	-0,402	0,128	0,136	0,043	-0,571	0,147	0,080	0,345	0,380	-0,230	0,191	0,630	-0,587	-0,451	1,000	

100CAQ = 100% de cascarilla de arroz quemada; 65CAQ = 65% cascarilla de arroz quemada - 35% fibra de coco; 35CAQ = 35% cascarilla de arroz quemada - 65% fibra de coco. 0R = 0% de los lixiviados son recirculados; 50R = 50% de los lixiviados son recirculados; 100R = 100% de los lixiviados son recirculados.

Bibliografía

- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía L., C. (Ed.). *Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Tercera edición. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. pp. 299-354.
- Abad, M.; Martínez, P.F.; Martínez M.D., y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*, 11, pp 141-154.
- Agarwala, S.C., Sharma, P.N., Chatterjee, C. and Sharma, P.C. 1980. Copper deficiency changes induced in wheat anther. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 46(2):172-176.
- Alarcón V., A.L. y Murcia. L. 2000. Cultivo en fibra de coco. En: Alarcón V., A.L. (Coordinador). *Tecnología para cultivos de alto rendimiento*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. pp. 245-260.
- Alarcón V., A. L. y L. Murcia F. 2000b. Sustratos y sistemas para cultivos sin suelo. En: *Tecnología para Cultivos de alto rendimiento*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, pp. 187-253.
- Asocolflores. 2014. Floricultura Colombiana Estadísticas 2011. En www.asocolflores.org. Consultado el 02-02-14.
- Ayers, R. S. y Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 29Rev. 1, Roma, 174 p.
- Baas, R., Nijssen, H. M. C., van den Berg, T. J. M. and Warmenhoven, M. G. 1995. Yield and quality of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) and gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) in a closed nutrient system as affected by sodium chloride. *Scientia Horticulturae*, 61:273-284.

- Baez, A. 1999. *Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo*. Monografía de postgrado en Producción Vegetal. Balcarce: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 53 p.
- Barber, S. 1995. *Soil Nutrient Bioavailability A Mechanistic Approach*. New York: John Wiley & sons, inc. 414 p.
- Barber, D.A. y Lee, R.B. 1974. The effect of micro-organisms on the absorption of manganese by plants. *New Phytology*, 73:97-106.
- Barker, V. y Pilbeam, J. 2006. *Handbook of Plant Nutrition*. Boca Raton: Taylor y Francis. 662 p.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*, 65:1-77.
- Bar-Yosef, B. 2008. Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses. In: Raviv, M. and Lieth, J.H. (Eds.). *Soilless culture: Theory and practice*. First ed. Amsterdam: Elsevier. 587 p.
- Bolívar C., P.A. 2011. Fertilización líquida: la opción eficiente en nutrición. Tendencias actuales. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Avances sobre fisiología de la producción de flores de corte en Colombia*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, pp. 69-71.
- Botero, C., A.M. 2007. *Evaluación de las propiedades químicas de los sustratos y suelo y su efecto sobre la nutrición en clavel estándar cv. 'Nelson'*. Tesis de maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. 302 p.
- Bonilla, C., García, A., Castillo, L., y Salazar., F. 1992. *Boro y zinc dos elementos limitantes en Colombia, situación del valle del cauca*. ICA programa suelos, Palmira: produmedios. pp. 18-41.
- Bonilla, I. 2008. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En: Azcón-Bieto, J. y Talón, M. *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw Hill. Madrid, pp 103-123.

- Bromfield, S.M. 1978. The effect of manganese-oxidizing bacteria and pH on the availability of manganous ions and manganese oxides to oats in nutrient solutions. *Plant and Soil*, 49:23-39.
- Bunt, A.C. 1988. *Media and mixes for container grown plants*. London: Unwin Hyman Ltd. 309p.
- Burés, S. 1997. Características de los sustratos. En: Burés, S. *Sustratos*. Madrid: Agrotecnia. 342p.
- Burnell, J.N. 1988. The biochemistry of manganese in plants. In: Graham, R.D., Hannam, R.J. and Uren, N.C. *Manganese in Soils and Plants*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 125-137.
- Cabrera, R.I. 2011. Importancia de la calidad química del agua en el fertirriego en cultivos ornamentales. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Avances sobre fisiología de la producción de flores de corte en Colombia*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, pp. 17-26.
- Casallas, A. 2008. Caracterización temporal de las propiedades químicas de la cascarilla de arroz tostada utilizada en el cultivo de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.). Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Bogotá. 64 p.
- Calderón, F. y Cevallos, F. 2001. *Los sustratos en Colombia*. En: www.drcalderonlabs.com.
- Castañón, G. y Brañas, L.J. 2007. *Recirculación de drenajes en cultivos sin suelo*. Zaragoza: Universidad Politécnica de Madrid. Jornadas de Experimentación en Fruticultura. 5 p.
- Cuervo, B., W.J., Flórez, R., V.J. y González, C.A. 2011. Avances sobre recirculación de drenajes en cultivos en sustrato. En: Leiva B., F.R. (Ed.). *Avances de la investigación agronómica 2009*. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 15-26. (en impresión)

- Dasgan, H.Y. y Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water use of tomato plants. *Acta Horticulturae*, 697:399- 408.
- Durán, M.J. y Martínez, E. 2000. *Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía*. Disponible en: www.eumedia.es/articulos. Consultado 06-06-10.
- Ehret, D.L., Menzies, J.G. and Helmer, T. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Scientia Horticulturae*, 106:103-113.
- Escudero, J. 1993. Cultivo hidropónico del tomate. En: *Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo*. Eds. F.Cámoas y J.R. Díaz. IEA/FIAPA, Almería, pp. 261-297
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R.B. 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77:185-268.
- Fageira, V.D. 2001. Nutrient Interactions In Crop Plants. *Journal of plant nutrition*, 24(8):1269-1290
- FAO. 1990. *Soilles Culture for Horticultural Crop Production*. FAO Plant Production and Protection Paper, nº 101. FAO, Rome 188p.
- FAO. 2005. Depósito de documentos de la FAO. Disponible en: www.fao.org/documents/show.cdr.asp
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1992. Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 24. Roma, 144 p.
- Fernández, A. de la C., Flórez R., V.J. y Chaves C., B. 2006. Niveles foliares de nutrientes en clavel variedad 'Nelson' y su relación con la producción En: Flórez R., V.J., Fernández, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp 237-247.
- Flórez R., V.J., Cuervo B., W.J. y González M., C.A. 2011. Avances sobre recirculación de drenajes en cultivos en sustrato. En: Leiva, F. (Ed.). *Avances de la investigación Agronómica 2009*. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. pp. 15-26.

- Flórez R., V. J., Parra R., R., Rodríguez S., M. y Nieto C., D.E. 2006. Características y fundamentos del proyecto "Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá". En: Flórez R., V.J., Fernández, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp. 3-40.
- García O., A. 1997. Manejo de la problemática de la salinidad en suelos fertirrigados. En: *Fertirrigacion*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 91-105.
- Geering, H.R., Hodgson, J.F. and Sdano, C. 1969. Micro nutrient cation complexes in soil solution: IV. The chemical state of manganese in soil solution. *Soil Science Society of America Journal*, 33:81-85.
- Gil M., F. 1995. *Elementos de Fisiología Vegetal*. Madrid: Mundi Prensa. 343p.
- Goldberdg, S. 1997. Reaction of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48
- González M., C., Quintero, M.F. y Meneses, V., 2006. Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos. En: Flórez R., V.J., Fernandez, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp. 427-448.
- Gunes, A., Alpaslan, M. y Inal, A. 1998. *Critical Nutrient Concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants*. Department of soil science and plant nutrition, Faculty of agriculture, University of Ankara. Turkey. 15 p.
- Guzmán P., J.M. 2006. Reutilización y recirculación, eficiencia y calidad de los sistemas cerrados. En: Flórez R., V.J., Fernandez, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp. 479-499.
- Handreck, K.A. and Black, N.D. 1994. *Growing media for ornamental plants and truff*. Sydney: University of New south Wales press Ltd. 448p.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. 1999. *Soil fertility and fertilizers*. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall. 499 p.

- Henao T., M.C. y Flórez R., V.J. 2006. Relación entre la composición química de los lixiviados y el tipo de sustrato en un sistema de producción de rosa sin suelo. En: Flórez R., V.J., Fernández, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp 265-282.
- Holley, W.D. y Baker. R. 1991. *Carnation production II* Kendall/Hunt publishing co. Debuque, Iowa.
- Komosa, A., Piróg, J., Weber, Z., & Markiewicz. B. 2011. Comparison of yield, nutrient solution changes and nutritional status of greenhouse tomato grown in recirculating and non-recirculating nutrient solution systems. *Journal of Plant Nutrition*. 34:10, 1473-1488.
- IRTA-Cabrils. 1998. Recirculación de soluciones nutritivas en fertirrigación. *Plantflor*, 11(6):23-26.
- Kirkby, E.A. and V. Römheld. 2007. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility. *Proceedings 543*, The International Fertilizer Society, United Kingdom. 52 p.
- Kuehl, R.O., 2001. *Diseño de experimentos principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Segunda edición. México: International Thomsom editors. 680 p.
- Lemaire, F. 1997. The problem of the biostability in organic substrates. *Acta Horticulturae*, 450:63- 69.
- Loué, A. 1988. Los microelementos en la agricultura. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. 354 p.
- Lora, R. 2010. Propiedades químicas del Suelo. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds.). *Ciencia del Suelo Principios Básicos*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 73-138.
- Loneragan, J.F. 1981. Distribution and movement of copper in plants. In: Loneragan, J.F., A.D. Robson and R.D.Graham. *Copper in Soils and Plants*. London: Academic Press. 220 p.

- Magán, J.J., M. Romera, F. Cánovas y E. Fernández. 1999. Ahorro de agua y nutrientes mediante un sistema de cultivo sin suelo con reuso del drenaje en tomate larga vida. XVII Congreso Nacional de Riegos. Murcia, 11 al 13 de mayo. pp.186-193.
- Marfà, O. 2001. *Utilización eficiente de los fertilizantes en cultivo intensivo hidropónico en circuito cerrado*. Cabriels: IRTA. 24p.
- Martínez, P. y Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, y automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-78.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd ed. San Diego: Academic Press. 889 p.
- Marin, G. 1994. *Fertilidad de Suelos con Enfoque en Colombia*. ICA, Division de disciplinas agrícolas. Tibaitata. 188 p.
- Mengel, K. and Kirkby, E.A. 2000. *Principles of plant nutrition*. Berna: International Potash Institute. 692 p.
- Metcalf, A. y Eddy, F. 1995. *Ingeniería de aguas residuales*. Tratamiento vertido y reutilización. España: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A. 1485 p.
- Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A.G., Mora, M.L., and Alberdi, M. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(4):470-481.
- Navarro B., S. y Navarro G., G. 2000. *Química agrícola*. Madrid: Mundi-prensa pp. 1-488.
- Nutriterra. 2011. Control De La Alcalinidad De Aguas De Riego Disponible en: http://www.nutriterra.com/doc/control_alcalinidad.pdf. Consulta Diciembre del 2011.
- Ortega, D. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. En: Silva, M.F. (Ed.). *Fertirrigación*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 135-147.
- Ortega, D. 2008. Manejo integrado de riego y fertilización en sistemas de producción de flores de corte bajo invernadero. En: *Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, pp 87 – 103.

- Parra R., R. y Flórez R., V.J. 2006. Reutilización de lixiviados en sistemas de producción de rosa en sustrato. En: Flórez R., V.J., Fernandez, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp 463-478.
- Parker, D.R. and Norvell, W.A. 1999. Advances in solution culture methods for plant mineral nutrition research. *Advances in Agronomy*, 65:151-213.
- Pettit, I.P. 2011. *Caracterización química de un suelo y tres mezclas de sustrato en rosa (rosa hybrida) variedad charlotte en un sistema de cultivo a solución perdida*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía. Bogotá. 226 p.
- Price, G.H. 1986. Ornamentals. In: Reuter, D.J. and Robinson, J.B. (Eds.). *Plant Analysis: An interpretation manual*. Melbourne: Inkata Press. pp. 188-218.
- Quintero, M.F. 2009. *Propiedades Hidro-Físicas de Cuatro Sustratos Usados en Cultivos de Flores de Corte en la Sabana de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Facultad de Agronomía. pp. 18-108.
- Quintero, M.F., González, C.A., y Guzmán, J.M. 2011. Sustratos para cultivos y flores de corte. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. pp. 78-108.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT user's guide, Version 9.1. Cary, NC: SAS Institute.
- Salisbury, F. B. y Ross, C.W. 1994. *Fisiología vegetal*. Cuarta edición. México: Iberoamericana. 759 p.
- Savvas, D. and Gizas, G. 2002. Response of hydroponically grow gerbera to nutrient solution recycling and different nutrient cation ratios. *Scientia Horticulturae*, 96:267-280.
- Stevenson, F.J. 1991. Organic Matter-Micronutrient Reactions in Soil. In: Mortvedt, J.J. (Ed.). *Micronutrients in Agriculture*. Madison: Soil Science Society of America. pp. 145-181.

- Sonneveld, C. 1988. The salt tolerance of greenhouse crops. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences*, 36:63-73.
- Sonneveld C. and Voogt S. J. 1980. The application of manganese in nutrient solutions for tomatoes grown in a recirculating system. *Acta Horticulturae*, 98: 171-178.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 1997. Effects of pH value and Mn application on yield and nutrient adsorption with rockwool grown gerbera. *Acta Horticulture*, 450:139-147.
- Sonneveld, C., Van den Ende, J. and De Bes S., S. 1990. Estimating the chemical composition of soil solutions by obtaining saturation extracts or specific 1:2 by volume extracts. *Plant Soil*, 122:169-175.
- Sonneveld, C. and Straver, N., 1994. Nutrient solutions for Vegetables and Flowers grown in water or substrates. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables, Aalsmeer/Naaldwijk, The Netherlands, Series: Voedingsoplossingen Glastuinbouw. pp. 8-45
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 2012. Fe, Mn y Zn Addition to nutrient solutions for tomato and cucumber grown in inert substrates. *Acta Horticulture*, 947:33-43.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 2009. Determination of micro nutrients in substrates by water extraction and interpretation of the analytical data. *Acta Horticulture*, 819:87-98.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Dordrecht: Springer Science. 431 p.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 2001. Chemical analysis in substrate systems and hydroponics – use and interpretation. *Acta Horticulture*. 548:247-259.
- Society of American Florists and Ornamental Horticulturists (SAF). 1981. *Standard grades for Carnations*. Alexandria.
- Soto, F., J. 2010. La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domesticas sanitarias. *Ingeniería Investigación y tecnología*, 11(2):167-177.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology*. 2^a ed. Sunderland: Sinauer associates, Inc. Publishers. 792 p.

- Triana M., Y., Castiblanco, E.M. y Flórez R., V.J. 2006. Comportamiento de nutrientes en un sistema de cultivo sin suelo en rosa. producción En: Flórez R., V.J., Fernández, A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp 249-264.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. En: Richards, L.A. (Ed.). *USDA Agriculture Handbook*, vol. 60. Washington: U.S. Print Office. Disponible en www.ussl.ars.usda.gov.
- White, J.G. and Zasoski, R.J. 1999. Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, 60:11-26.