



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización química de mezclas de materiales orgánicos y minerales con potencial de uso en cultivos sin suelo

Oscar Iván Monsalve Camacho

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Maestría en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas
Bogotá, Colombia
2016

Caracterización química de mezclas de materiales orgánicos y minerales con potencial de uso en cultivos sin suelo

Oscar Iván Monsalve Camacho

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas

Directora:
Martha Cecilia Henao Toro, Ph.D.
Profesor Asociado

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Maestría en Ciencias Agrarias, Línea Suelos y Aguas
Bogotá, Colombia
2016

*A mi esposa Nadia Luque y nuestro hijo
Jacobó Monsalve Luque, porque son mi fortaleza y
mi verdadero horizonte.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia y a todas las personas que me brindaron su apoyo para la realización de este trabajo.

A la profesora Martha Henao por su guía, apoyo y sobre todo por su comprensión e inmensa humanidad, quien no solo se limitó a guiar y corregir mi trabajo, sino que además fue un apoyo constante desde antes de entrar a la maestría.

A Ferdy Alfonso Alvarado, Edwin Villagran y Sebastian Gutierrez por su apoyo durante todo el proceso de recolección de datos en campo.

A Ceniflores por todo el apoyo financiero, logístico y administrativo.

A Cenired y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por el apoyo financiero

A las empresas Aurora SAS, Suata Plants S.A. e Ipanema LTDA por abrirme sus puertas para realizar la investigación en campo.

A la Universidad Nacional de Colombia

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)

Y a todos los que directa o indirectamente aportaron su granito de arena para que pudiera alcanzar el objetivo.

Resumen

En Colombia existen 227 viveros certificados, aproximadamente 1.200 ha de clavel y mini clavel, 500 ha de rosa, y otras áreas no reportadas de especies hortícolas sembradas en sistemas de cultivo sin suelo (CSS). El manejo del agua en este sistema de cultivo es uno de los factores clave del proceso, por lo que la investigación de las propiedades físicas e hidrofísicas de algunos materiales ha tenido gran relevancia, no obstante, el estudio de sus propiedades químicas es escasa. Es así, como se realizó una búsqueda de materiales provenientes de residuos agrícolas o agroindustriales principalmente, pero también de residuos industriales y de minas, disponibles en el territorio nacional, que fueran viables para su implementación en CSS. Los materiales se caracterizaron, determinando sus propiedades químicas, algunas propiedades físicas, concentración de metales pesados, propiedades de estabilidad, presencia de organismos fitopatógenos, costo, disponibilidad y facilidad de manejo. Con base en los resultados, los materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), sustrato de coco (SC) y cascarilla de palma (CP) y los materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), piedra pómez (PP), perlita (PE), vermiculita (VE) y zeolita (ZE) se definieron como los más promisorios y aptos para ser utilizados en sistemas de cultivo sin suelo. De acuerdo con esto, se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de estos materiales mezclados en tres proporciones (orgánico:mineral): 75-25, 50-50 y 25-75, sobre 1) las propiedades químicas de los sustratos: pH, CE, CIC, concentración de iones en fase soluble: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , en fase intercambiable: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , y micronutrientes: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} tanto en estado natural, sin contacto con raíces, agua o nutrientes externos y en fase de cultivo (muestreos a los 7 y 24 ddt); 2) las propiedades químicas de los lixiviados: pH, CE, concentración de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y Cl^- ; y 3) porcentaje de prendimiento, peso fresco de raíces (Pf.Raíz), peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y concentración de macro y micronutrientes de esquejes de clavel. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3+8)$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Los resultados muestran que la concentración de sales disminuye y la reacción se hace más ácida cuando se comparan los sustratos en estado natural con su estado en fase de cultivo. Así mismo, el SC y la VE mostraron la mayor CIC, que concuerda con el mayor Pf.Raíz. No se aprecian diferencias notables entre los 7 y los 24 ddt, aunque si se aprecian diferencias entre la fase cultivo y la fase en estado natural. Se presentó una correlación altamente significativa entre CE, pH, K^+ y PO_4^{2-} de los lixiviados y la CA mostró los mayores valores. Ninguna de las mezclas presentó una concentración de NO_3^- que sobrepasara el rango adecuado. El porcentaje de prendimiento fue del 100% en todos los sustratos evaluados. Aunque se presentaron diferencias en cuanto a la concentración de nutrientes en tejido vegetal, no hubo una correlación significativa entre esta concentración y el Pf.Raíz. Los materiales de origen

mineral no mostraron una tendencia que evidenciara una influencia clara de algún material en particular sobre el Pf.Raíz. Los sustratos que generaron un mayor Pf.Raíz mostraron adecuadas relaciones elementales N/P, N/S, N/K, Ca/K y Ca/B y Mg/Mn en el tejido vegetal. Los sustratos presentan propiedades químicas que se deben tener en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización. Se sugiere tener en cuenta la tendencia salina y alcalina de la CA para establecer programas de riego y fertirriego. Los esquejes ganaron mayor Pf.Raíz en aquellas mezclas con SC, mientras que la CP no presentó diferencias significativas con la CA, por lo que la CP se muestra como un material promisorio para ser utilizado en sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: material mineral, material orgánico, propiedades químicas, propiedades de estabilidad, cationes, aniones, adsorción, desorción, acidez, salinidad, clavel.

Abstract

In Colombia exists 227 certified nurseries, near to 1.200 ha of carnation and mini carnation, 500 ha of roses, and another areas of vegetable species not reported, planted in soilless culture (SLC). Water manage in this crop system is one of the key factors of the process, so that the research of the physical and hydro physical properties of some materials has been very important, however, the study of it's chemical properties is scare. Thus, as a search of materials from agricultural waste and/or agroindustrial mainly took place, but also industrial waste and mining available in the country, which were viable for implementation in (SLC). Materials were characterized, determining it's chemical properties, some physical properties, heavy metals concentration, stability properties, phytopathogen organism presence, cost, availability and ease of handling. Based on the results, the organic origin materials: rice husk (RH), coconut substrate (CS) and palm husk (PH) and the mineral origin materials: coal slag (CS), pumice, (PU), perlite (PE), vermiculite (VE) and zeolite (ZE) were defined as the most promissory and suitable to be used in soilless culture. Accordingly, an investigation was conducted to evaluate the behavior of these materials mixed in three proportions (organic: mineral): 75-25, 50-50 and 25-75, on 1) the chemical properties of the substrates: pH, EC, CEC, ion concentration in soluble phase: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} ; exchangeable phase: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ and micronutrients: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} and Zn^{2+} , both, natural state, non contact with roots, water or nutrients and external growth phase (sampling at 7 and 24 ddt); 2) the chemical properties of leachates: pH, EC, concentration of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} and Cl^- ; and 3) anchorage percentage, root fresh weight (Fw.Root), shoot fresh weight (Fw.Shoot) and concentration of macro and micornutrientes of carnation cuttings. A completely randomized design (CRD) was set with incomplete factorial arrangement of treatments, nested in 3 stages, with isolated control group (3X5X(3)+8), with three factors: factor 1) material of organic origin, with 3 levels; factor 2) material mineral origin; with 5 levels and factor 3) ratio (nested); with 3 levels, plus 8 unalloyed materials (isolated control group), for a total of 53 treatments (substrates). Results shows that the salt concentration decreases and the reaction becomes more acidic when compares substrates in unprocessed with state under cultivation. Likewise, the SC and VE showed the highest CIC, consistent with the highest Fw.Root. No significant differences between 7 and 24 ddt be seen, although differences between the cultivation phase and phase in their natural state are appreciated. A highly significant correlation between EC, pH, K^+ and PO_4^{3-} leachate was presented and RH showed the highest values. None of the mixtures has a concentration of NO_3^- that exceeded the appropriate range. The anchorage percentage was 100% in all substrates tested.

Although differences in the concentration of nutrients in plant tissue occurred, there was no significant correlation between the concentration and Fw.Root. Mineral materials doesn't showed a trend that evidenced a clear influence of any particular material on Fw.Root. Substrates that generated higher Fw.Root also showed suitable ratios N/P, N/S, N/K, Ca/K and Ca/B and Mg/Mn in plant tissue. Substrates exhibit chemical properties, it must be taken into account in water and fertilization integrated management programs. It is suggested to have the saline and alkaline trend of RH into account in establishing irrigation and fertigation programs. Cuttings gained higher Fw.Root in those mixtures with CS, while the PH showed no significant differences with the RH, for that reason, the PH is shown as a promising material for use in soilless systems.

Keywords: mineral material, organic material, chemical properties, stability properties, cations, anions, adsorption, desorption, acidity, salinity, carnation.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XVI
Lista de tablas	XX
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XXVI
Introducción general.....	29
1. Marco teórico.....	32
1.1 El cultivo sin suelo (CSS).....	32
1.1.1 El cultivo sin suelo en Colombia	32
1.2 Generalidades sobre sustratos	33
1.3 Propiedades químicas de los sustratos.....	34
1.3.1 Capacidad de intercambio catiónico.....	35
1.3.2 Liberación de nutrientes a partir de los sustratos	36
1.3.3 Propiedades químicas de sustratos orgánicos	37
1.3.4 Propiedades químicas de sustratos inorgánicos.....	39
1.4 Relación química sustrato planta	42
1.4.1 Efecto de la planta sobre la disponibilidad de nutrientes	42
1.4.2 Relación entre la planta y las propiedades químicas de las superficies de los sustratos	42
2. Caracterización y selección de materiales promisorios para uso en sistemas de cultivo sin suelo, en Colombia	44
2.1 Resumen	44
2.2 Introducción	45
2.3 Materiales y métodos.....	45
2.3.1 Ubicación y adquisición de materiales. Construcción de la base de datos con materiales de referencia (BMR)	45
2.3.2 Variables evaluadas	45
2.3.3 Análisis de datos	46
2.3.4 Priorización de materiales a partir de la BMR.....	46
2.4 Resultados y discusión	50
2.4.1 Ubicación y adquisición de materiales.....	50
2.4.2 Concentración total de nutrientes.....	51
2.4.3 Caracterización de las propiedades de intercambio	54
2.4.4 Concentración de metales pesados	57
2.4.5 Propiedades físicas	58

2.4.6	Propiedades de estabilidad.....	59
2.4.7	Propiedades microbiológicas	60
2.4.8	Costo, manejo y disponibilidad	61
2.4.9	Priorización de materiales a partir de la BMR	62
2.4.9.1	Priorización de materiales de origen orgánico	62
2.4.9.1	Priorización de materiales de origen mineral	63
2.1	Conclusiones.....	65
3. Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales		66
3.1	Resumen.....	66
3.2	Introducción.....	66
3.1	Materiales y métodos	67
3.1.1	Localización y material vegetal	67
3.1.2	Diseño experimental y de tratamientos	67
3.1.2.1	Caracterización de sustratos en crudo	67
3.1.2.2	Caracterización de sustratos en cultivo.....	68
3.1.3	VARIABLES ESTUDIADAS.....	68
3.1.3.1	VARIABLES ASOCIADAS A LA RESPUESTA DEL SUSTRATO	68
3.1.3.1	VARIABLES ASOCIADAS A LA RESPUESTA DE LA PLANTA	69
3.1.4	Análisis de datos.....	69
3.2	Resultados y Discusión	70
3.2.1	Mezclas de sustratos en su estado natural	70
3.2.2	Respuesta de la planta	71
3.2.3	Conductividad eléctrica.....	73
3.2.4	pH.....	75
3.2.5	Concentración de iones en fase soluble	78
3.2.6	Propiedades de intercambio	83
3.2.7	Concentración de micronutrientes.....	87
3.3	Conclusiones.....	90
4. Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos		92
4.1	Resumen.....	92
4.2	Introducción.....	92
4.3	Materiales y métodos	93
4.4	Resultados y Discusión	94
4.4.1	Conductividad eléctrica y pH.....	94
4.4.2	Concentración de cationes	98
4.4.3	Concentración de aniones	104
4.4.4	Fracción lixiviada	107
4.5	Conclusiones.....	109
5. Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos.....		110
5.1	Resumen.....	110
5.1	Introducción.....	111
5.1	Materiales y Métodos	112
5.2	Resultados y Discusión	113
5.2.1	Porcentaje de prendimiento y peso fresco de brotes y raíz	113
5.2.2	Concentración de elementos mayores en tejido vegetal	117

5.2.3	Concentración de elementos menores en tejido vegetal	121
5.3	Conclusiones	124
Conclusiones generales		125
Literatura citada		126
Anexos		136
	ANEXO 1. Resultados de la comparación entre los tratamientos evaluados en el estudio “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”	136
	ANEXO 2. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”	150
	ANEXO 3. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”	160

Lista de figuras

Figura 1. Materiales de origen orgánico. Donde a) coco astillas; b) coco fibra; c) coco sustrato; d) palma cascarilla; e) palma fibra; f) palma tusa prensada; g) madera viruta; h) madera aserrín e i) café cisco.	50
Figura 2. Materiales de origen mineral. Donde a) arena; b) cobre escoria; c) carbón escoria; d) perlita; e) piedra pómez; f) ladrillo molido; g) vermiculita y h) zeolita.	52
Figura 3. Resultados de la calificación de cada material de origen orgánico caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Estb = Propiedades de estabilidad; Micr = Propiedades microbiológicas; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.	63
Figura 4. Resultados de la calificación de cada material de origen mineral caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.	64
Figura 5. Evaluación de la propagación de esquejes de clavel var. Pomodoro en condiciones de invernadero, en los diferentes sustratos evaluados.	68
Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).	72
Figura 7. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$	73
Figura 8. CE de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$	75
Figura 9. Comparación del pH de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$	76
Figura 10. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$	77
Figura 11. Comparación de la concentración de cationes en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$	78
Figura 12. Comparación de la concentración de aniones en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de trasplante. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$	79

Figura 13. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	80
Figura 14. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	81
Figura 15. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	82
Figura 16. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	83
Figura 17. Propiedades de intercambio de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	84
Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.	85
Figura 19. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	86
Figura 20. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	87
Figura 21. Concentración de micronutrientes de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	88
Figura 22. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	89
Figura 23. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	90
Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.....	95
Figura 25. Comparación del pH de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	96
Figura 26. CE de los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.	97

Figura 27. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.	98
Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas en los lixiviados.	100
Figura 29. Concentración de cationes de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	101
Figura 30. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	102
Figura 31. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	103
Figura 32. Concentración de aniones de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	104
Figura 33. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.	105
Figura 34. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.	106
Figura 35. Comparación de la fracción lixiviada (FL) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	107
Figura 36. Fracción lixiviada (FL) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.	108
Figura 37. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).	116
Figura 38. Peso fresco de parte aérea (Pf.Aérea) y de raíz (Pf.Raíz) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	116
Figura 39. Peso fresco de brotes (Pf Aérea) y peso fresco de raíz (Pf Raíz) de las pantas sembradas en CA, CP y SC mezclada en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.	117
Figura 40. Concentración de N, P, K, Ca, (a y d); Mg, S, Na y Fe (b y e) y Cu, Mn, Zn y B (c y f) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); n=15.	118
Figura 41. Concentración de N, P y S del tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.	119

Figura 42. Concentración de cationes intercambiables en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.	120
Figura 43. Concentración de Fe, Cu, Mn, Zn y B en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.	123

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen orgánico utilizados en cultivo sin suelo.....	39
Tabla 2. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen mineral utilizados en cultivo sin suelo.....	41
Tabla 3. Niveles óptimos recomendados para las características químicas de sustratos para cultivo.	47
Tabla 4. Ponderación de las variables evaluadas en la selección de materiales promisorios para uso en CSS en Colombia”.	48
Tabla 5. Inventario de materiales recolectados para la selección de materiales.....	51
Tabla 6. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen orgánico seleccionados.....	53
Tabla 7. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen mineral seleccionados.....	53
Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre los cationes totales e intercambiables presentes en los materiales seleccionados.	54
Tabla 9. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen orgánico seleccionados.	54
Tabla 10. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen mineral seleccionados.	55
Tabla 11. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales orgánicos seleccionados.....	56
Tabla 12. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales minerales seleccionados.....	56
Tabla 13. Concentración de metales pesados de cada material de origen orgánico recolectado.	57
Tabla 14. Concentración de metales pesados de cada material de origen mineral recolectado.	57
Tabla 15. Análisis físico de los materiales de origen orgánico recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.	58
Tabla 16. Análisis físico de los materiales de origen mineral recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.....	59
Tabla 17. Propiedades de estabilidad de los materiales de origen orgánico recolectados.	60
Tabla 18. Análisis microbiológico de los materiales orgánicos.	61

Tabla 19. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen orgánico recolectados en la caracterización y selección de materiales.	61
Tabla 20. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen mineral recolectados en la caracterización y selección de materiales.	62
Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables en fase soluble e intercambiable evaluadas (n = 318).....	70
Tabla 22. Componentes (CP), escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 19 se alcanzó el 71% de la variabilidad de los datos.	71
Tabla 23. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001).....	72
Tabla 24. Propiedades y composición química del agua de riego utilizada en la investigación.	79
Tabla 25. Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades y composición química de los lixiviados evaluados (n = 318).....	99
Tabla 26. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados en la caracterización de lixiviados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001).....	99
Tabla 27. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP) en la caracterización de los lixiviados. En el CP 4 de 13 se alcanzó el 72% de la variabilidad de los datos.	100
Tabla 28. Niveles de nutrientes (en base seca) reportados para clavel en la sabana de Bogotá. Fuente: Ortega (1997).....	111
Tabla 29. Relaciones catiónicas óptimas en tejido vegetal de clavel, establecidas para los elementos expresados en mg Kg ⁻¹ . Fuente: Medina, 2006.	112
Tabla 30. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001); (“***” 0,001); (“**” 0,01); (“.” 0,05).	113
Tabla 31. Variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel al momento de la siembra en sustratos. Pf. Aérea = Peso fresco de parte aérea (brotes); Pf.Raíz = Peso fresco de raíz.	114
Tabla 32. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel evaluados.	114
Tabla 33. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 14 se alcanzó el 62% de la variabilidad de los datos.	115
Tabla 34. Relaciones elementales en tejido vegetal de las tres mezclas que produjeron esquejes con mayor y menor Pf.Raíz, comparado con las relaciones adecuadas definidas por Medina (2006) y el sustrato testigo utilizado comercialmente (CA100). Datos presentados en mg Kg ⁻¹	122
Tabla 35. Propiedades químicas y concentración de iones en fase soluble, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”.	136
Tabla 36. Propiedades químicas y concentración de cationes en fase intercambiable, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”.	137

Tabla 37. Propiedades químicas y concentración de micronutrientes y P disponibles, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”.....	139
Tabla 38. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	140
Tabla 39. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9).	142
Tabla 40. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	143
Tabla 41. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9).	144
Tabla 42. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	145
Tabla 43. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9).....	147

Tabla 44. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).....	148
Tabla 45. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).....	149
Tabla 46. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).....	150
Tabla 47. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).....	152
Tabla 48. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).....	153
Tabla 49. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).....	154
Tabla 50. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).....	155

Tabla 51. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	156
Tabla 52. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9).	158
Tabla 53. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), los demás son media de nueve observaciones (n=9).....	159
Tabla 54. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y raíz (Pf.Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	160
Tabla 55. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf.Aérea) y raíz (Pf.Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico-material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos de sustratos control son medias de tres observaciones (n=3), demás datos son medias de nueve observaciones (n=9).....	161
Tabla 56. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).....	162
Tabla 57. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico – material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron	

diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).....	164
Tabla 58. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico-material mineral-proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).....	164
Tabla 59. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de <i>Dianthus caryophyllus</i> propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).....	166

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>CSS</i>	Cultivo sin suelo
<i>MPr</i>	Material priorizado
<i>MO</i>	Material de origen orgánico
<i>MM</i>	Material de origen mineral
<i>BMR</i>	Base de datos con materiales de referencia
<i>AR</i>	Arena
<i>ECf</i>	Carbón escoria fina
<i>ECm</i>	Carbón scoria mixta
<i>CE</i>	Cobre scoria
<i>LM</i>	Ladrillo molido
<i>PE</i>	Perlita
<i>PP</i>	Piedra pómez
<i>VE</i>	Vermiculita
<i>ZE</i>	Zeolita
<i>CA</i>	Cascarilla de arroz quemada
<i>CC</i>	Café cisco
<i>AC</i>	Coco astillas
<i>FC</i>	Coco fibra
<i>SCf</i>	Coco sustrato fino
<i>SCg</i>	Coco sustrato grueso
<i>AM</i>	Madera aserrín

Abreviatura Término

<i>AV</i>	Madera viruta
<i>CP</i>	Palma cascarilla
<i>FP</i>	Palma fibra
<i>TP</i>	Palma tuza prensada

Introducción general

En Colombia existen 227 viveros certificados (ICA, 2012), aproximadamente 1.200 ha de clavel y mini clavel, 500 ha de rosa (Asocolflores, 2013), y otras áreas no reportadas de especies hortícolas sembradas en sistema de cultivo sin suelo (CSS). Este sistema generalmente se utiliza cuando existe presión por enfermedades o plagas de suelo de muy difícil control (Cárdenas *et al.*, 2006), aunque también se implementa cuando hay necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro, la de superar problemas de salinidad y agotamiento del suelo, cuando se realizan cultivos intensivos de manera continua, y la de controlar el suministro de agua y nutrientes en el entorno radicular (Fornes y Belda, 2014; Medina, 2006). En el país este sistema ha ganado tanta importancia, que una de las demandas de la agenda de Flores y Follajes – Flores tradicionales, en el área temática “Manejo de suelos y aguas” es la “Viabilidad técnica y económica en la implementación de diferentes sustratos dentro del sistema productivo de flores” (Portal siembra, 2015).

En viveros comerciales¹, donde se utiliza turba principalmente, se han venido desarrollando estudios encaminados a encontrar materiales alternativos (Pulido y Escobar, 2009). De igual forma, en cultivos comerciales se ha venido utilizando casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA) como material para CSS, debido a su amplia disponibilidad y bajo costo. No obstante, las áreas sembradas en CSS están creciendo² y la disponibilidad de CA está disminuyendo³.

Localmente se han desarrollado investigaciones con materiales alternativos a la CA, tales como sustrato de coco, escoria de carbón y zeolita, mezclados en diferentes proporciones entre ellos, o mezclados con CA (Flórez *et al.*, 2006; Ulloa *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2006; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Monsalve *et al.*, 2009; Peña *et al.*, 2009; Petitt, 2011). Sin embargo, dada su gran relevancia, estos estudios se han enfocado principalmente en el desarrollo de los cultivos y las propiedades físicas de estos sustratos, y aunque existe una amplia investigación relacionada con el riego, la fertilización y las propiedades físicas de sustratos implementados en CSS, la literatura enfocada a las propiedades químicas de estos medios de cultivo es escasa (Silber, 2008).

¹ En este documento se diferencia cultivo comercial de vivero comercial. El primero hace referencia a cultivos de los cuales se obtiene el producto cosechable. El segundo hace referencia a lugares especializados donde se obtiene material de propagación, como esquejes y plántulas.

² Existen aproximadamente 5000 ha sembradas en rosa, y aproximadamente 500 de esas 5000 en sustrato. Cada año más fincas de producción de rosa trasladan su producción de rosa en suelo a sustrato (Asocolflores, 2013).

³ Debido a los TLCs se está viendo amenazada la producción de arroz en Colombia (Quintero *et al.*, 2013).

Por otro lado, la determinación de las proporciones de los materiales en la mezcla obedece más a un procedimiento de prueba y error, que a un esquema técnico, basado en las características físicas y químicas de los materiales a mezclar y del resultado de su mezcla, y teniendo en cuenta que pocas veces un material por sí solo tiene las propiedades más adecuadas para unas determinadas condiciones del cultivo, en la mayoría de los casos será necesario mezclarlo con otros materiales, en distintas proporciones, para adecuarlo a las condiciones requeridas (Ansorena, 1994; Cadahía, 2005; Henao y Flórez, 2006 y Raviv y Heinrick, 2008). Sin embargo, definir cuál es la mejor mezcla de materiales a utilizar para una determinada especie, resulta en un proceso largo y dispendioso, pues pueden existir cientos o miles de combinaciones, dependiendo de los materiales disponibles y la cantidad y proporción de los mismos dentro de la mezcla.

Con base en todo lo anterior, se aprecia que es necesario desarrollar un estudio que permita conocer detalladamente las propiedades químicas, tanto de los materiales promisorios que se encuentren en el territorio nacional, como de sus mezclas en diversas proporciones, complementando de esta forma los estudios encaminados a conocer sus propiedades físicas e hidrofísicas. Esto con el fin de tener un acervo de materiales que puedan ser implementados para diversos cultivos y viveros en CSS y que a su vez permitan sustituir o complementar el uso de los materiales utilizados tradicionalmente. Es así, como en el presente documento se desarrollaron cinco capítulos: en el primero se presenta una revisión del estado actual de los cultivos sin suelo en Colombia y el mundo, haciendo énfasis en el estudio químico que se ha desarrollado; en el segundo se exponen los resultados de la búsqueda de materiales de origen orgánico y mineral, disponibles en el territorio nacional, que mostraron posibilidad para ser utilizados en CSS, a estos materiales se les realizó una caracterización física, química, de estabilidad y económica para definir cuales presentaban la mayor viabilidad para ser utilizados en CSS; posteriormente, en el capítulo tres, se realizaron mezclas entre los materiales de origen orgánico y mineral viabilizados y se evaluaron sus propiedades y composición química en el sistema sustrato-planta; en el capítulo cuatro se evaluó el comportamiento químico de los lixiviados generados por cada uno de los sustratos viabilizados y sus mezclas; y finalmente, en el capítulo cinco, se evaluó el comportamiento de los exquejes de clavel sembrados en cada uno de los sustratos.

Objetivo General

Caracterizar materiales de origen orgánico y mineral disponibles en el territorio nacional, y seleccionar, a partir de sus propiedades individuales y en mezcla, los más promisorios para ser utilizados en cultivos sin suelo.

Objetivos específicos

1. Caracterizar materiales obtenidos a partir de residuos de mina, industriales, agrícolas y/o agroindustriales, y priorizar aquellos que pueden ser implementados en Cultivos Sin Suelo (CSS).
2. Evaluar la composición y propiedades químicas de la fase soluble e intercambiable de las mezclas (orgánico-mineral) de materiales priorizados.

3. Evaluar la composición química del lixiviado de las mezclas (orgánico-mineral) de materiales priorizados.
4. Identificar los sustratos más promisorios, en función de la respuesta en establecimiento, crecimiento y concentración de nutrientes de esquejes de clavel.

1. Marco teórico

1.1 El cultivo sin suelo (CSS)

Por cultivo sin suelo (CSS), se entiende cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva, o sobre cualquier sustrato con adición de esta solución (Biauxuli y Aguilar, 2002).

Los CSS se han venido desarrollando desde hace más de ocho décadas en el mundo (Ulloa, *et al.*, 2006; Raviv y Heinrick, 2008). Se clasifican en hidropónicos (cultivo de agua más nutrientes o sobre minerales inertes) y cultivos en sustrato (cultivos sobre materiales químicamente activos) (Botero y Flórez, 2006; Raviv y Heinrick, 2008). Lo que los caracteriza a todos es el uso de soluciones nutritivas⁴ para el desarrollo de las plantas que crecen en este medio.

Este sistema generalmente se utiliza cuando existe presión por enfermedades o plagas de suelo de muy difícil control. No obstante, esta forma de cultivo también se utiliza cuando hay otros factores fuertemente limitantes en el suelo, como la salinización, el agotamiento de la fertilidad natural y el deterioro físico (Medina, 2006).

1.1.1 El cultivo sin suelo en Colombia

La implementación en Colombia de este sistema de cultivo se inició principalmente en viveros comerciales, los cuales utilizan sustratos para el desarrollo del material de propagación. Posteriormente, se desarrolló en cultivos de clavel y mini clavel, inducida por la presencia de *Fusarium oxysporum f. sp. Dianthi* (Quintero, 2013 y Medina, 2006), que es posiblemente el patógeno más importante para este cultivo. La presencia de este patógeno en los suelos de la sabana de Bogotá y el hecho de que la desinfección de estos sea inviable desde el punto de vista económico, ambiental y legal⁵ (Quintero, 2013), hizo necesaria la implementación de CSS para el cultivo de clavel. Nuevos cultivos han comenzado a trasladarse a CSS. Es así, como rosa, tomate y algunas hortalizas de hoja ya se están produciendo en CSS, debido a problemas de salinidad, degradación estructural de los suelos y con el fin de mantener un mayor control del Manejo Integrado del Riego y la Fertilización (MIRFE).

En la mayoría del área en CSS en Colombia se ha venido utilizando casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA) como sustrato, no obstante, el uso de este material posee los siguientes problemas técnicos:

⁴ Por solución nutritiva se entiende, el agua con oxígeno (O₂) y todos los nutrientes esenciales para las plantas, disueltos en una forma inorgánica completamente dissociada, aunque en la solución pueden existir formas orgánicas disueltas, procedentes de los micro elementos en forma de quelato (Biauxuli y Aguilar, 2002).

⁵ La prohibición del uso de bromuro de metilo está consignado en el Protocolo de Montreal de 1987

- No es conveniente utilizar la cascarilla recién salida del cultivo (cruda), debido a la posibilidad de que contenga residuos de productos agroquímicos, agentes fitosanitarios o semillas de arvenses. Su implementación en este estado tiene la desventaja de que el material posee una capacidad de retención de humedad demasiado baja (Monsalve *et al.*, 2009), lo cual dificulta el manejo del riego y fertirriego. Todo esto hace que el material deba pasar por un proceso de tostado, que genera problemas ambientales (Quintero *et al.*, 2014) e incrementa el costo del material.
- Durante los últimos años se ha venido generando usos alternos a esta cascarilla (elaboración de concreto, por ejemplo), que amenaza su futura disponibilidad (Asocolflores, 2013).
- Se han estado reduciendo las áreas sembradas con arroz (2004 – 580.000 ha; 2013 – 240.000 ha (Agronet, 2015), debido a la importación de arroz proveniente de países con los que Colombia ha generado tratados de libre comercio (Quintero *et al.*, 2013).

1.2 Generalidades sobre sustratos

De acuerdo con Abad y Noguera (1998), el término sustrato se aplica a todo material distinto al suelo *in situ*, colocado en un contenedor (puro o mezclado) para permitir el anclaje del sistema radicular vegetal. El sustrato puede o no intervenir en el proceso de nutrición de las plantas, dependiendo si es o no químicamente inerte (Medina, 2006). En general, se puede resumir que un sustrato para el cultivo de plantas es todo material que puede proporcionar anclaje, oxígeno y agua suficiente para el óptimo desarrollo de las mismas, o en su caso nutrimentos, requerimientos que pueden cubrirse con un solo material o en combinación con otros, los cuales deberán ser colocados en un contenedor (Cruz *et al.*, 2013).

Los sustratos implementados en CSS requieren de un manejo muy similar al de un suelo, ya que, como lo menciona Henao y Flórez (2006), cumplen cinco funciones básicas: 1. Proporcionar un soporte físico a la planta, 2. Retener agua en forma disponible, 3. Disponer del espacio poroso necesario para garantizar el intercambio gaseoso entre la raíz de la planta y la atmósfera, 4. Servir como un reservorio de nutrientes para las plantas, y 5. Albergar poblaciones de microorganismos importantes en el ciclo de nutrientes y el control de enfermedades. Esto indica que lo deseable de un sustrato, es que sea un material que se asemeje a las características físicas y químicas de un suelo “ideal” para el desarrollo del cultivo que se va a sembrar en él.

La elección de un determinado sustrato va a depender, por orden de prioridad: de la disponibilidad del mismo, del costo, de sus propiedades, de la finalidad de la producción y especie cultivada, de las condiciones climáticas, de la experiencia de manejo, homogeneidad y de las posibilidades de instalación (Biauxuli y Aguilar, 2002). Como complemento, Henao y Flórez (2006), indican que las principales propiedades físicas y químicas que deben evaluarse para la selección de un sustrato son: tasa de

descomposición⁶, densidad aparente, espacio poroso total, espacio poroso para aireación, capacidad de retención de humedad, pH, conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

El uso de sustratos para cultivo de plantas debe tener en cuenta, entre otras, las siguientes consideraciones:

- El suelo y los sustratos son medios porosos y sus principios físicos y químicos son similares (Wallach, 2008), sin embargo, cuando se estudia la física de los sustratos es necesario hacer ciertas adaptaciones, debido al limitado espacio para el crecimiento de las raíces, en comparación al suelo (Wallach, 2008).
- El desafío para el productor en CSS es el control de la solución nutritiva, ya que si bien, la capacidad tampón del sustrato podría ayudar a regular el contenido nutricional del mismo, disminuyendo la inducción de deficiencias o toxicidades nutricionales, no todas las mezclas de sustratos tienen esta capacidad tampón, por lo que un error en la aplicación de fertilizantes, afectaría más seriamente a las plantas que crecen en CSS que aquellas cultivadas en suelo.
- El riego y fertirriego dependen de las propiedades del sustrato, no es factible establecer un régimen que cubra todos los posibles materiales y sus mezclas, ya que como lo mencionan Raviv y Heinrick, 2008, si varios sustratos se riegan con regímenes de riego idénticos, a pesar de sus diferentes características físicas, se podría dar ventajas a unos, mientras que otros pueden ser regados en una frecuencia que no responde con sus propiedades.
- No existe un sustrato con propiedades físicas y químicas ideales para el desarrollo de todas las especies. Cada especie requiere, para su correcto desarrollo, unas condiciones particulares del medio de cultivo. Por ejemplo, para el enraizamiento de esquejes de algunas especies de flores es necesario un porcentaje de porosidad de aire mayor al 20 %, mientras que para el crecimiento de plántulas de algunos frutales, este no debe superar el 10 %, por esta razón, se evidencia un menor desarrollo para algunas especies que crecen en medios de cultivo con un porcentaje de porosidad de aire considerado ideal (Wallach, 2008).
- La combinación y proporción de los materiales del sustrato debe ser cuidadosamente estudiada, según los requerimientos de cada especie, pues el volumen limitado de los contenedores exige óptimas propiedades físicas y químicas para el crecimiento de las plantas (Landis *et al.*, 1.990; Gerding *et al.*, 1996; Lavado, 2000).

1.3 Propiedades químicas de los sustratos

Aunque en Colombia no se ha reglamentado el uso de sustratos como medio de cultivo de plantas hortícolas, en el mundo se han definido los niveles óptimos para las propiedades químicas más importantes. Un resumen de estos niveles se presenta en la Tabla 3.

⁶ Esta tasa de descomposición no es tan relevante cuando los sustratos son utilizados en viveros y semilleros, debido a que comúnmente los tiempos de propagación son cortos, menores a sesenta días.

1.3.1 Capacidad de intercambio catiónico

Las superficies de las partículas y otros sólidos en sustratos hortícolas, sobre todo aquellos de origen orgánico o volcánico, poseen carga eléctrica permanente y/o variable. Las cargas negativas permanentes se presentan en sustratos minerales constituidos por silicatos, y resultan de procesos de sustitución isomórfica (Sposito, 2008), la cual es una sustitución del catión estructural de las capas tetraédricas u octaédricas de los silicatos, por otro de menor valencia, con el mismo número de coordinación y tamaño similar, (ejemplos comunes son: Si^{4+} por Al^{3+} o Al^{3+} por Mg^{2+}) (Sposito, 2008). El grado de adsorción de cationes a la superficie es la capacidad de intercambio catiónico (CIC; $\text{cmol}_{(c)} \text{Kg}^{-1}$) (Sposito, 2008). Las cargas variables dependen del pH de la solución del suelo y son generadas por procesos de adsorción de H^+ y OH^- en las superficies sólidas de óxidos metálicos, hidróxidos, silicatos microcristalinos (alófana o imogolita) o sobre grupos orgánicos funcionales (Stevenson, 1994).

La CIC de algunos sustratos de origen orgánico e inorgánico se presenta en la Tabla 1 y Tabla 2. La turba, viruta de pino y compost presentan alta CIC ($80 - 160 \text{ cmol}_{(c)} \text{Kg}^{-1}$), dependiente del pH (Brown y Pokorny, 1975; Puustjarvi, 1977; Daniels y Wright, 1988). Su carga es derivada principalmente de la ionización de grupos carboxilo COOH y en un menor grado de grupos fenólicos OH (Stevenson, 1994). Sustratos comunes como perlita y fibra de coco rara vez se utilizan individualmente, generalmente están contenidos dentro de una mezcla de materiales con cargas superficiales tanto permanentes como variables (Silber, 2008).

La afinidad de los cationes por las superficies cargadas negativamente, bajo igual concentración en la fase acuosa del sustrato, es afectada por las características del ion, tales como valencia, tamaño y estatus de hidratación (Silber, 2008). La afinidad de los cationes divalentes es más alta que los monovalentes, debido a su mayor carga, y usualmente la fuerza de adsorción relativa sigue el siguiente orden: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$ (Barber, 1995). Sin embargo, la concentración de los cationes en una solución de fertirriego no es igual, generalmente la concentración de K^+ excede la de Ca^{2+} , Mg^{2+} o NH_4^+ (Silver, 2008).

El K^+ no está envuelto en reacciones de precipitación de una forma substancial. Ya que es un catión, puede ser adsorbido por las superficies cargadas negativamente y esto puede reducir su disponibilidad para las plantas. Cabe resaltar, que al igual que otros cationes, el fraccionamiento del K^+ entre la solución del sustrato y la superficie sólida, depende de su concentración relativa en la solución y de la afinidad con los sitios de intercambio (Silber, 2008). El NH_4^+ es una fuente de N para las plantas que generalmente no se precipita. La alta afinidad del NH_4^+ por las superficies cargadas negativamente, afecta su disponibilidad para las plantas (Silber, 2008). Los cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} también presentan una alta afinidad a las superficies cargadas negativamente (Barber, 1995) y además están envueltos en reacciones de precipitación, especialmente con H_2PO_4^- y SO_4^{2-} . La disponibilidad del P en la rizósfera es gobernada por la actividad del Ca^{2+} y Mg^{2+} (Silber, 2008). Debido a que los micronutrientes como Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} son iones de adsorción específica (IAE), su afinidad a las superficies cargadas es más alta que la de los otros cationes, y por estar involucrados en reacciones de precipitación, su disponibilidad para las plantas es muy baja (Silber, 2008).

En condiciones de cultivo, la reacción de intercambio puede ser benéfica en los casos donde a) la concentración de Na^+ o de un catión tóxico (tal como un metal pesado) en la solución del medio de crecimiento disminuye, como resultado de la adsorción, o b) cuando la concentración de un catión benéfico en el medio acuoso se incrementa como resultado de la desorción. Por otro lado, la reacción de intercambio podría ser nociva cuando a) hay un incremento en la concentración de un catión tóxico en la solución, por procesos de desorción o b) por la disminución de la concentración de un catión benéfico en la solución del suelo, a través del proceso de adsorción (Silber, 2008).

La solubilidad del NO_3^- , que es la mayor fuente de N para crecimiento de plantas, es muy alta, sin embargo su afinidad con los sitios de carga positiva es muy baja, comparado con H_2PO_4^- o SO_4^{2-} , en consecuencia, la concentración de NO_3^- en la solución del sustrato es prácticamente inalterada por reacciones de precipitación y/o de adsorción (Silber, 2008).

1.3.2 Liberación de nutrientes a partir de los sustratos

El objetivo de reducir el riesgo de contaminación que representan para el medio ambiente el exceso de fertilización en la producción sin suelo, ha llevado a encaminar esfuerzos para regular la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera y para desarrollar sustratos que puedan suministrar nutrientes durante el periodo de crecimiento de los cultivos hortícolas (Silber, 2008). La reducción del exceso de fertilización puede ser obtenido, en cierta medida, a través de dos procesos: 1) pre-carga de los sustratos con nutrientes que son posteriormente liberados durante el periodo de crecimiento, es decir, el sustrato funciona como un fertilizante de lenta liberación, y 2) liberación de nutrientes nativos de los sustratos, como un resultado de procesos bioquímicos, tales como mineralización de N en medios orgánicos o disolución de nutrientes nativos desde componentes inorgánicos (Silber, 2008).

Para pre-cargar los sustratos es necesario que estos tengan una alta CIC y/o capacidad de intercambio aniónico (CIA). Algunos materiales utilizados ampliamente, como perlita y piedra pómez, poseen una baja CIC, por lo que no serían susceptibles de ser pre cargados, mientras que las zeolitas, que poseen una muy alta CIC (200-400 cmol. Kg^{-1}) (Mumpton, 1999) podrían ser pre-cargadas, adicionando los cationes adecuados. Teóricamente, si todos los sitios de intercambio de la zeolita fueran pre-cargados con iones de K^+ , el cúmulo de K^+ total sería de 80 a 160 g Kg^{-1} . Según Bar-Yosef (1999), aproximadamente 200 g de zeolita son requeridos para satisfacer la demanda de K^+ a través del ciclo de crecimiento de tomate y pimentón en condiciones de cultivo intensivo, que es de 15 a 20 g por planta. La tasa de liberación debe coincidir con la demanda de la planta, de acuerdo con el estado fenológico, que puede ser baja al inicio y se incrementa gradualmente durante las siguientes etapas de crecimiento. Además, los nutrientes pre-cargados son liberados desde los sitios de la superficie a través de reacciones de intercambio con otros iones (para el caso del K^+ , con Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ y Na^+). Factores tales como concentración de iones antagonistas en la solución del sustrato, dosis de irrigación y actividad de la planta, afectan la tasa de liberación de nutrientes, por consiguiente, su disponibilidad no es regulable y puede ser diferente a la demanda de la planta (Silber, 2008).

La contribución de nutrientes nativos, liberados a partir de sustratos inorgánicos es usualmente muy baja durante el ciclo de cultivo y, excepto en unos pocos casos donde

se utiliza roca fosfórica, es casi despreciable. Los sustratos orgánicos, por otro lado, y especialmente compost, contienen altas cantidades de N, por consiguiente, la producción en estos medios de cultivo puede ser importante (Silber 2008). De igual forma, la tasa de liberación de N va a depender del tipo de sustrato orgánico, de su relación C/N, de su grado de madurez, de su forma de obtención y de las condiciones climáticas, especialmente temperatura y humedad relativa, que pueden afectar los procesos biológicos y bioquímicos. Sin embargo, la incorporación de compost con altas concentraciones de N, puede permitir una reducción de la tasa de aplicación de N durante las primeras etapas de crecimiento del cultivo (Silber, 2008). Esto es particularmente importante bajo sistemas de agricultura orgánica y en situaciones donde la reducción de contaminantes es importante (Silber, 2008). Estos hallazgos pueden ser particularmente aplicables en cultivos de ciclo corto, tales como plántulas, que generalmente toman hasta 35 días (Raviv et al., 1998).

1.3.3 Propiedades químicas de sustratos orgánicos

Cascarilla de arroz (CA): Es un sustrato orgánico, obtenido a partir de la producción de granos de arroz (*Oryza sativa* L.), los cuales se encuentran dentro de una cascarilla formada por las glumillas adheridas al grano. Cuando el grano se descascara se obtiene como subproducto la CA, que es de baja tasa de descomposición por su alto contenido de sílice (Quintero, 2014), su pH es circumneutral (6,3) y su conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico son bajas (0,3 dS cm⁻¹ y 21 cmol_c Kg⁻¹, respectivamente) (Quintero *et al.*, 2012).

Schmitz *et al* (2002), quien caracterizó las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz en comparación con otros materiales, encontró que el pH de la CA se encuentra por encima del óptimo reportado para sustratos de origen orgánico, el cual debe estar dentro del rango 5,2 - 5,5 (Kampf y Fermino, 2000). Por otra parte, el contenido total de sales solubles debe encontrarse por debajo de los 0,5 g L⁻¹ para sustratos hortícolas (Conover, 1967). En cuanto a este aspecto, la CA presentó valores de 0,30 g L⁻¹, que se ajustan a lo reportado como ideal (Tabla 3). En relación con la CIC y contenido de carbono orgánico, la CA quemada presenta valores bajos (8,5 cmol_c Kg⁻¹ y 17,3%, respectivamente). De acuerdo con Quintero *et al.* (2011), el K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ intercambiable de la CA quemada, previo a su uso, presentan un nivel promedio de 10,2, 3,76, 2,45 y 1,88 cmol_c Kg⁻¹, respectivamente.

Sustrato de coco: Fibra es el nombre que se le da al material que constituye el mesocarpio del fruto de coco (*Cocos nucifera*) (Abad *et al.*, 2002) y del cual se obtiene el sustrato de coco.

Evans *et al* (1996), determinaron las propiedades físicas y químicas del sustrato de coco proveniente de diversas fuentes. En cuanto a las variables químicas, los valores más altos se presentaron en el contenido de K y Cl para todos los materiales estudiados, encontrándose entre 19 a 948 y 26 a 1636 mg Kg⁻¹, para K y Cl, respectivamente, lo que se relaciona posiblemente con que en algunas zonas productoras de fibra de coco para sustrato, el manejo de la fertilidad de la plantación se realiza con base en fuentes como KCl (Evans *et al.*, 1996). Adicionalmente, la planta de coco se considera semi-halófito, lo que hace que absorba sales y las transporte incluso al fruto en desarrollo (Jenagathan, 1992). En general, la variabilidad en los contenidos nutricionales de la fibra de coco está

en función del procesamiento del material de partida y de las condiciones en las cuales se produce la palma. Se debe tener en cuenta además, que leves deficiencias de N pueden presentarse cuando se usa fibra de coco en cultivos (Noguera *et al.*, 2000).

Apaolaza y Guerrero (2008), compararon la capacidad de retención de cadmio (Cd) plomo (Pb), zinc (Zn) y nitrato (NO_3^-) de la corteza de pino y la fibra de coco cuando son mezcladas con cantidades crecientes de sedimentos (0%, 15% y 30% v:v). La alta capacidad de retención de iones minimiza el riesgo ambiental de liberación de contaminantes al ambiente, cuando este tipo de residuos son usados con fines agrícolas. Se encontró además, que la corteza de pino presentó menor cantidad de NO_3^- en el lixiviado en comparación con la fibra de coco. Orlando *et al.* (2002), afirmaron con respecto a esto, que la capacidad de adsorción de NO_3^- por parte de la corteza de pino es mayor ($1,06 \text{ mmol g}^{-1}$) en comparación con la de la fibra de coco ($0,89 \text{ mmol g}^{-1}$). Con relación a los metales pesados estudiados, la corteza de pino puede adsorber los elementos de la solución acuosa en el orden $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. La retención de metales pesados por estos materiales puede ser atribuida a la formación de complejos con los grupos carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato y grupos aminoácidos de proteínas, carbohidratos y compuestos fenólicos.

De Farias *et al.* (2012), caracterizaron algunas propiedades físicas y químicas del sustrato de coco. Con relación al pH y la conductividad eléctrica, se encontraron valores de 5,97 y $0,6 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente.

Cascarilla de palma: Aunque existe un gran potencial de este residuo agrícola, no hay muchos trabajos concernientes a su uso en CSS. Asiah *et al.* (2004), determinaron las diferencias en cuanto a propiedades físicas y químicas entre sustratos locales a base de cascarilla de palma y su efecto en el crecimiento y el contenido de nitrógeno de plantas de coliflor. Con respecto a las propiedades químicas, el pH mostró valores de 6,9, la CE $1,3 \text{ dS m}^{-1}$, N total 0,42%, P 0,23%, K 1,56%, Ca 0,08% y Mg 0,05%. Las propiedades químicas, en particular el pH, que para este material tiende a ser alcalino, puede causar problemas en cuanto a la disponibilidad de micronutrientes. La baja respuesta que se presentó en el crecimiento de las plantas sembradas en cascarilla de palma se relacionó con las altas tasas de inmovilización de N por los microorganismos. Adicionalmente, un efecto negativo del material sobre el crecimiento de las plantas se explica por el cambio en sus propiedades físicas y químicas, es decir, por la inestabilidad del sustrato, que puede causar compactación, disminución del espacio poroso, alteración del tamaño de partículas e incrementos del pH y la salinidad. Reportes de Zanin *et al.* (1998), sobre bajos contenidos de lignina de la cascarilla de palma (22-25%) en comparación con otros materiales, muestran que este material es susceptible a la degradación microbiana, lo cual lo hace inestable si se usa como sustrato antes de ser compostado. Se concluye que la cascarilla de palma debe ser sometida a un proceso de compostaje para alcanzar su bioestabilidad, antes de ser usada como sustrato para crecimiento de plantas.

En la Tabla 1 se pueden apreciar las propiedades y composición química de algunos sustratos de origen orgánico.

Tabla 1. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen orgánico utilizados en cultivo sin suelo.

PROPIEDAD	Unidad	Cascarilla arroz	Turba	Sustrato coco	Cascarilla palma
pH		5,8 (a)	6,1 (d)	5,97 (f)	6,9 (g)
CE	dS m ⁻¹	0,3 (b)	0,36 (d)	0,6 (f)	1,3 (g)
CIC		25,5 (a)	90 a 140 (e)	39 a 60 (e)	95 (h)
K		10,2 (a)	0,32 (d)	0,59 (d)	0.13 (h)
Ca	cmol _c Kg ⁻¹	3,76 (a)	0,86 (d)	0,14 (d)	0.15 (h)
Mg		2,45 (a)	0,25 (d)	0,05 (d)	0.21 (h)
Na		1,88 (a)	0,16 (d)	0,55 (d)	
NO ₃			85 (d)	14 (d)	
Cl			57 (d)	206 (d)	
SO ₄	mg Kg ⁻¹		340 (d)	51 (d)	
PO ₄		183 a 275 (a)	18 (d)	14 (d)	42.8 (h)
SiO ₂	%	94 (c)			

Fuente: a) Fuente: a) Quintero *et al.* (2011); b) Quintero *et al.* (2012); c) Quintero (2014); d) Ansorena (1994); e) Puustjarvi y Robertson (1975); f) De Farias *et al.* (2012); g) Asiah *et al.* (2004); h) Ghehsareh y Kalbasi (2012).

1.3.4 Propiedades químicas de sustratos inorgánicos

Escoria de carbón: En Colombia existen un gran número de industrias y plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan el carbón como fuente de energía (Quintero, 2014). Cuando el carbón se quema se produce como residuo entre el 12 y el 20% en peso de un material grueso y granular, así como un 2% de cenizas que pueden ser utilizados como sustrato (Quintero, 2014).

Este material también se puede obtener a partir de los hornos siderúrgicos, que trabajan fundamentalmente a partir de chatarra y arrabio, que es una forma de hierro mineral, compuesto básicamente por hierro, óxidos y chatarra. Cualquiera sea la base del acero producido, como subproducto del proceso se generará una escoria (Serna, 2012).

La escoria de carbón se ha evaluado en producción de especies como tomate (Peña *et al.*, 2009) y clavel (Quintero *et al.*, 2012), encontrando que las plantas crecen de forma óptima en este sustrato, ya sea mezclado, o de forma individual, y aunque algunos autores pueden considerarlo un material inerte, la escoria de carbón puede presentar fijación de fósforo o excesos de boro (Martínez y Roca, 2011). En la Tabla 2 se pueden apreciar algunas de las propiedades químicas de este material.

Perlita: Es un silicato de aluminio de origen volcánico, compuesto de rocas vítreas formadas por enfriamiento rápido que dan lugar a un material amorfo con un 2-5% de agua (Abad *et al.*, 2004). Este material es tratado industrialmente con altas temperaturas, de forma que el agua se evapora rápidamente, haciendo que el material se expanda, dando un producto final de baja densidad (Fernández, 2010).

Silver *et al.* (2012), determinaron que la adsorción de Zn por la perlita fue dependiente del pH, la fuerza iónica y la temperatura; todo esto relacionado con una combinación de afinidad química por los sitios de adsorción y un componente electrostático que se relaciona, a su vez, con la carga superficial, todo controlado por el pH. El incremento en la temperatura condujo a un incremento del pH y finalmente al aumento en la adsorción de Zn. La adsorción específica de Zn modificó las características de carga de la perlita, por lo tanto, la adsorción de este elemento afectó indirectamente el comportamiento de otros iones, tales como P.

Gul *et al.* (2007), compararon el efecto de dos fuentes fertilizantes, abono orgánico y solución nutritiva, sobre la producción de pepino, sembrado en diferentes sustratos: perlita + zeolita (3:1), perlita + zeolita (1:1), toba volcánica + zeolita (3:1) y toba volcánica + zeolita (1:1), (v:v). El rendimiento del cultivo mostro mejores resultados en medios basados en perlita. Lo anterior relacionado con una mayor capacidad de retención de agua de la perlita en comparación con la toba volcánica.

Piedra pómez: La piedra pómez, pumita o pumicita, es un mineral de origen volcánico (piroclastico) poroso; se origina durante el enfriamiento muy rápido del magma ascendente de alta viscosidad; características de las vulcanitas claras y ácidas, como la riolita, y por ello son de color blanco grisáceo hasta amarillento, algunas veces de color pardo o gris (Daniels y Hammer, 1992).

Está compuesta de 71% de SiO₂, 12,8% de Al₂O₃, 1,75% de Fe₂O₃, 1,36% de CaO, 3,23% de Na₂O, 3,83% de K₂O y 3,83 de H₂O (Boodt *et al.*, 1974). Sus propiedades pueden variar de unos a otros lugares (Martínez y Roca, 2011). En general su pH es ligeramente alcalino, con baja salinidad ocasional que se puede reducir parcialmente con lavado (Martínez y Roca, 2011).

Vermiculita: Se obtiene a partir de un tipo de micas sometido a temperaturas superiores a los 800°C. Su densidad aparente es de 990 a 1400 kg m⁻³, puede retener hasta 350 L de agua m⁻³ y posee alta capacidad de aireación, aunque tiende a compactarse (Terrés *et al.*, 2001). Ciertos sustratos minerales de naturaleza arcillosa, como la vermiculita, tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral (Abad, 1993; Abad y Noguera, 1998).

Olivo y Baduba (2006), estudiaron la influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernadero. En la comparación de los sustratos se observó que las plantas desarrolladas en el sustrato turba + vermiculita obtuvieron mayor tamaño en todas las variables. El mejor comportamiento de los sustratos formados con vermiculita puede deberse a que dicho componente inorgánico brindaría las mejores condiciones fisicoquímicas para el crecimiento vegetal. Sin embargo, Landis *et al.* (1990), señalan que la vermiculita es estructuralmente inestable y por ello debe emplearse en mezclas con un componente que provea resistencia a la compactación. En este estudio, la combinación de turba con vermiculita resolvió satisfactoriamente esta debilidad cuando se analizó el peso húmedo de toda la planta, el peso seco de la parte radical y el peso seco de las raíces secundarias.

Zeolita: Son silicatos de aluminio hidratados, cristalinos, caracterizados por poseer una estructura que les genera propiedades particulares de adsorción e intercambio de

cationes, lo cual las hace potencialmente útiles en CSS, particularmente la clinoptilolita (una especie de zeolita), que tiene una alta capacidad de intercambio de iones (Harland *et al.*, 1999). La fórmula general de la clinoptilolita es $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5}, \text{Ba}_{0.5}, \text{Mg}_{0.5})_6 [\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}] \sim 20\text{H}_2\text{O}$ (Montes *et al.*, 2014).

Según Quian *et al.* (2001), las zeolitas son minerales con estructura porosa (porosidad > 40%), que presentan alta capacidad de intercambio catiónico. En el estudio realizado por Harland *et al.* (1999), se examinó la reutilización de zeolita como sustrato para cultivo de pimiento. Las mediciones de crecimiento, rendimiento y calidad de fruto no mostraron disminuciones con el reciclaje del material. Los análisis de tejido foliar y específicamente los contenidos de nitrógeno, mostraron una caída significativa a través de los tres años de duración del experimento. Los análisis de lixiviados mostraron una disminución en los niveles de nitrógeno y potasio, mientras que se presentó un aumento en los niveles de sodio, relacionado con la baja capacidad de adsorción de sodio de este material.

Gul *et al.* (2005), evaluaron el efecto de zeolita y perlita, sobre el crecimiento de plantas de lechuga crespa, absorción de nutrientes y cantidad de lixiviados como NO_3^- , P, K^+ , Ca^{2+} y Na^+ . Los resultados mostraron que la zeolita presenta ventajas como sustrato en comparación con la perlita, ya que con el uso de este material se obtuvo un incremento en el peso de la cabeza de la lechuga. Este efecto se atribuyó a un incremento en la absorción de algunos nutrientes, como N y K cuando se usa la zeolita, debido a su alta CIC. Además, este material actúa como reservorio, manteniendo elementos en su estructura para su lenta desorción a la solución del sustrato o directamente a la rizósfera. De igual manera, se presentó una disminución en la lixiviación de K^+ y NO_3^- .

En la Tabla 2 se pueden apreciar las propiedades y composición química de algunos sustratos de origen mineral.

Tabla 2. Propiedades químicas de algunos sustratos de origen mineral utilizados en cultivo sin suelo.

PROPIEDAD	Unidad	Escoria carbón	Perlita	Piedra pómez	Vermiculita	Zeolita
pH		5.5 (a)	6.9 (b)	6.3 (e)	7.5 (b)	5.65 (g)
CE	dS m ⁻¹	2.5 (a)	0.4 (c)		2 a 5.4 (f)	0.30 (g)
CIC		3.3 (a)	13 (c)	10 a 60 (c)	27 (b)	23 (b)
K			0.02 (c)			42.57 (g)
Ca	cmol _c Kg ⁻¹		0,1 (c)			6.65 (g)
Mg			0.05 (c)			6.08 (g)
Na						31.36 (g)
PO ₄	mg Kg ⁻¹		6 (c)			
SiO ₂	%		73-74 (d)	70-75 (e)	20-25(e)	64-68 (e)

Fuente: a) Quintero *et al.* (2012); b) Martínez y Roca (2011); c) Ghehsareh y Kalbasi (2012); d) Abad *et al.* (2005); e) Sonneveld y Voogt (2009); f) Kang *et al.* (2004); g) Urbina *et al.* (2006).

1.4 Relación química sustrato planta

1.4.1 Efecto de la planta sobre la disponibilidad de nutrientes

Los efectos del crecimiento de la planta sobre la solubilidad de nutrientes en la rizósfera son específicos y principalmente relacionados con la constante de formación entre iones inorgánicos y ligandos orgánicos excretados por las raíces (Silber, 2008). Por ejemplo, las constantes de formación ($\log K^0$) de ácido cítrico y ácido oxálico con K son 1,2 y 1,1 respectivamente, comparado con 4,8, 3,8, y 4,7, y 3,4, 9,9 y 13,0 para los mismos dos ácidos con Ca, Mg y Al, respectivamente (Martell y Smith, 1989). Por consiguiente, en presencia de plantas y con la consecuente formación de ácidos orgánicos excretados por la raíz a la rizósfera, los complejos solubles Ca-, Mg- y Al-ligando serán predominantes, mientras la proporción de K-ligando será menor.

En cuanto a la solubilidad de nutrientes, uno de los resultados más significativos del crecimiento de raíces, es el aumento de la disponibilidad de P, debido a que su presencia en la solución está gobernada por reacciones de adsorción/desorción y precipitación/disolución; por consiguiente su concentración puede caer a niveles de deficiencia (Silber, 2008). Los exudados de las raíces promueven un medio ácido en la rizósfera, que facilita la solubilización y posterior disponibilidad de P para las plantas (Marschner, 2012), por ende, el hecho de que en CSS la densidad de raíces sea mayor, probablemente implique un mayor efecto sobre la disponibilidad de P, comparado con lo sucedido en cultivos en suelo (Silber, 2008).

1.4.2 Relación entre la planta y las propiedades químicas de las superficies de los sustratos

Generalmente la CIC de las raíces tiene el mismo orden de magnitud de los constituyentes de los suelos ($10\text{-}100 \text{ cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$) (Marschner, 2012). La CIC de las raíces es dependiente del pH y la adsorción de iones sigue el mismo mecanismo que el de los suelos. Sin embargo, no resulta tan clara la contribución de las raíces a las propiedades de carga del medio, debido a que los altos valores de CIC reportados para las raíces, fueron relacionados principalmente con las paredes celulares (Marschner, 2012), los iones deben atravesar el apoplasto desde la solución, lo cual sugiere que la CIC de la superficie de las raíces sea menor (Marschner, 2012).

Con respecto al pH, los efectos de sus cambios en la rizósfera son causados por la excreción de iones (principalmente H^+ , OH^- y ácidos o bases orgánicas), los cuales equilibran la carga eléctrica, siguiendo la absorción de iones por las raíces, respiración de las raíces, exudación de carbono o procesos redox (Hinsinger *et al.*, 2003). El efecto de las plantas sobre el pH de la rizósfera está ampliamente relacionado con las propiedades químicas de las fases sólidas, pues se sabe que la acumulación de ácidos orgánicos solubles, excretados desde las raíces en presencia de un medio inerte, puede inducir a la disminución del pH (Silber, 2008).

Finalmente, el CSS se caracteriza por las restricciones de expansión que tiene el sistema de raíces, en comparación con cultivos en suelo, lo cual conduce a una mayor densidad de raíces en CSS (Silber, 2008). Por esta razón, Morel y Hinsinger (1999) sugieren que

en CSS, las raíces tienen un impacto más significativo sobre las propiedades del medio que aquellas que crecen en suelo.

2. Caracterización y selección de materiales promisorios para uso en sistemas de cultivo sin suelo, en Colombia

2.1 Resumen

Los sistemas de cultivo sin suelo (CSS) utilizan sustratos compuestos por materiales provenientes de diversos orígenes, los cuales interactúan con la planta de la misma forma como lo hace el suelo. En Colombia, el sustrato más utilizado en cultivos comerciales es la cascarilla de arroz (CA), mientras que en viveros comerciales se usa principalmente la turba; lo cual ha generado una alta dependencia a estos materiales por parte de los agricultores. En búsqueda de otras alternativas se realizó una selección de materiales provenientes de residuos agrícolas o agroindustriales principalmente, pero también de residuos industriales y de minas, disponibles en el territorio nacional, que fueran viables para su implementación en CSS. Los materiales se caracterizaron, determinando sus propiedades químicas, concentración de metales pesados, propiedades de estabilidad, presencia de organismos fitopatógenos, costo, disponibilidad y facilidad de manejo. Para determinar cuáles materiales se consideraban más promisorios, se definieron ponderadores para cada variable y se asignó una puntuación ponderada. Con base en los resultados, el sustrato de coco, la cascarilla de palma y la cascarilla de arroz (materiales de origen orgánico), y la escoria de carbón, piedra pómez, perlita, vermiculita y zeolita (materiales de origen mineral), se definieron como los más promisorios y aptos para ser utilizados en sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: sustrato mineral, sustrato orgánico, propiedades químicas, propiedades de estabilidad.

Abreviaciones:

BMR	Base de datos con materiales de referencia	CC	Café cisco
CSS	Cultivo sin suelo	AC	Coco astillas
MO	Material de origen orgánico	FC	Coco fibra
MM	Material de origen mineral	SCf	Coco sustrato fino
MPr	Materiales priorizados	SCg	Coco sustrato grueso
AR	Arena	AM	Madera aserrín
ECf	Carbón escoria fina	AV	Madera viruta
ECm	Carbón escoria mixta	CP	Palma cascarilla
CuE	Cobre escoria	FP	Palma fibra
LM	Ladrillo molido	TP	Palma tuza prensada
PE	Perlita		
PP	Piedra Pómez		
VE	Vermiculita		
ZE	Zeolita		
CA	Arroz cascarilla quemada		

2.2 Introducción

Elegir un sustrato es un proceso que debe tener en cuenta múltiples factores, tales como: disponibilidad del mismo, costo, propiedades, finalidad de la producción y especie cultivada, condiciones climáticas, experiencia de manejo y homogeneidad (Biauxuli y Aguilar, 2002). Generalmente los sustratos son mezclas de diferentes materiales de origen orgánico y/o mineral, ya que como lo enuncian Ansorena (1994), Cadahía (2005); Henao y Flórez (2006) y Raviv y Heinrick, (2008), pocas veces un material por sí solo tiene las características físicas y químicas más adecuadas para unas determinadas condiciones del cultivo, en la mayoría de los casos, para adecuarlo a las condiciones requeridas, será necesario mezclarlo con otros materiales en distintas proporciones. Sin embargo, precisar cuál es la mejor mezcla de materiales a utilizar para una determinada especie resulta en un proceso largo y dispendioso, pues pueden existir muchas combinaciones, dependiendo de los materiales disponibles y la cantidad y proporción de los mismos dentro de la mezcla.

Existen diversos estudios llevados a cabo para caracterizar materiales que sirvan como medio de cultivo, principalmente de materiales disponibles cerca de las zonas de producción. No todos los materiales que existen para CSS están disponibles para su uso, y la elección de un material que sirva como medio de cultivo debe considerar múltiples variables (Liu, 2015). El objetivo del presente capítulo es caracterizar materiales obtenidos a partir de residuos de mina, industriales, agrícolas y/o agroindustriales, y priorizar aquellos que pueden ser implementados en Cultivos Sin Suelo (CSS).

2.3 Materiales y métodos

Se construyó una base de datos con información detallada de materiales provenientes de minas, residuos industriales, agrícolas y/o agroindustriales que tuvieran algún potencial para ser implementados en CSS. Esta base de datos con materiales de referencia (BMR) se construyó a partir de la siguiente secuencia de actividades:

2.3.1 Ubicación y adquisición de materiales. Construcción de la base de datos con materiales de referencia (BMR)

Para identificar y adquirir los materiales con posibilidad para ser utilizados en CSS se realizó una recopilación de información primaria y secundaria, revisando resultados de proyectos referentes a sustratos que se han realizado en Colombia. En la selección de los materiales, se dio énfasis a residuos agrícolas y agroindustriales y aquellos de origen mineral que ya tuvieran algún antecedente de uso en CSS.

Una vez se recopiló la información, se identificaron los materiales que se incluirían en la BMR y pasarían a la etapa de caracterización.

2.3.2 Variables evaluadas

Ya reunidos todos los materiales en la BMR, se determinaron las propiedades químicas: pH con el método potenciométrico; CE (Conductividad Eléctrica) con el método

conductimétrico – lectura a 25 °C; CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) y bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na), por el método del acetato de amonio 1M pH 7; para determinar la CIC se desplazó el NH_4^+ intercambiado con NaCl, y se hizo la valoración por titulación; las bases se determinaron en el extracto de acetato de amonio por espectrofotometría de absorción atómica; la concentración de los elementos totales (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn y Zn, se determinó mediante calcinación de la muestra a 600°C, realizando la valoración por espectrofotometría de absorción atómica; P total, mediante calcinación a 600°C, realizando valoración colorimétrica con molibdato y vanadato de amonio; B total, mediante calcinación a 600°C, realizando valoración colorimétrica con azometina-H. Las propiedades físicas se determinaron así: D_p (Densidad aparente), mediante pesado de un volumen conocido de material seco; la retención de agua a 0,33, 5 y 15 bares de presión, con el plato y olla de tensión.

Adicionalmente se determinó la concentración de los metales pesados: Cd, Co, Cr, mediante digestión ácida; Pb, con absorción atómica con llama, As^7 , Hg y Se, por absorción atómica con generador de hidruros. También se determinaron las propiedades de estabilidad: relación C/N y concentración de hemicelulosa, celulosa, lignina (de acuerdo con la metodología sugerida por Van Soest *et al.* (1991) y silicio.

Finalmente se determinó la presencia y concentración de hongos, bacterias y nematodos fitopatógenos, *E. Coli* y Coliformes totales.

2.3.3 Análisis de datos

Los materiales se agruparon según su origen mineral (MM) y orgánico (MO) y se realizó una descripción de las propiedades de cada material incluido en la BMR. Se realizó una matriz de correlación de Pearson entre las variables evaluadas con el software R-Project 3.2.3.

2.3.4 Priorización de materiales a partir de la BMR

Una vez se caracterizó cada material incluido en la BMR, se viabilizaron aquellos que presentaron las mejores propiedades, teniendo en cuenta los rangos de mínimo, máximo y óptimo expuestos en la Tabla 3, pero que además tuvieran viabilidad económica y de suministro, la cual se determinó contrastando los costos y disponibilidad de cada material con los de la cascarilla de arroz (CA).

⁷ El arsénico (As) no aparece reportado en la tabla periódica de los elementos como metal. No obstante, tradicionalmente se ha incluido en el grupo de los metales pesados.

Tabla 3. Niveles óptimos recomendados para las características químicas de sustratos para cultivo.

VARIABLE	UNIDAD	MINERAL	ORGÁNICO	
pH ** (b)		5,5 a 7,0	5,5 a 7,0	
CE (b)	dS m ⁻¹	< 2,0	< 2,0	
N- NH₄ (a)	mg L ⁻¹	< 20	< 20	
N-NO₃ (a)		100 a 199	100 a 199	
P (a)		6 a 10	6 a 10	
K (a)		150 a 249	150 a 249	
Ca (a)		200 a 3000	200 a 3000	
Mg (a)		70 a 3000	70 a 3000	
Cenizas (a)		%	< 20	< 20
MO (a)	NA		> 80	
CO (a)	NA		40 a 50	
C/N (a)		NA	> 40	
CIC (a)	Cmol _c Kg ⁻¹	> 20	> 20	
Fe (b)	mg Kg ⁻¹	< 3	< 3	
Mn (b)		<3	<3	
Cu (b)		< 0,5	< 0,5	
Zn (b)		< 3	< 3	
B (b)		< 0,5	< 0,5	
METALES PESADOS				
Cd (c)		mg Kg ⁻¹	< 3,6	< 0,72
Cr (c)	< 250		< 50	
Cu (c)	< 120		< 24	
Zn (c)	< 365		< 73	
As (c)	< 105		< 5000	
Co (d)	< 50		< 50	
Hg (c)	µg Kg ⁻¹	< 1150	< 230	
Ni (c)		< 200	< 10	
Pb (c)		< 325	< 65	
PROPIEDADES FÍSICAS				
D. Aparente (b)	g cm ⁻³	<0,4	<0,4	
RH - 0,1 bar (b)	%	25 a31	25 a31	
Tamaño partícula (b)	Mm	0,25 a 2,5	0,25 a 2,5	

** Determinado en extracto de saturación; NA = No aplica, RH = Retención de humedad. Fuente, adaptado de: a) Gallegos (2008); b) Ansorena (1994); c) RHP (2007); d) Vendock *et al* (1987) en Ansorena (1994).

Con el fin de establecer un método para la elección de los materiales más promisorios, se tuvo en cuenta lo reportado por Abad *et al.* (2005), quien sugiere que para obtener buenos resultados para la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del sustrato:

- **Propiedades físicas:** los sustratos deben reunir las siguientes propiedades físicas: a) elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible (20-30% en volumen); b) suficiente suministro de aire (10-30 % en volumen); c) distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones antes mencionadas; d) baja densidad aparente ($<0,4 \text{ g cc}^{-1}$); e) elevada porosidad total ($> 85\%$ en volumen) y f) estructura estable, que impida la contracción o expansión del sustrato
- **Propiedades químicas:** a) Baja CIC cuando la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, o alta CIC cuando la fertirrigación se realice esporádicamente; b) suficiente nivel de nutrientes asimilables; c) baja salinidad; d) pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón y e) mínima velocidad de descomposición.
- **Otras propiedades:** a) libre de semillas, arvenses, fitopatógenos y sustancias fitotóxicas; b) disponibilidad; c) bajo costo, d) facilidad de preparación y de manejo; e) facilidad de desinfección y estabilidad frente a la desinfección; f) resistencia a cambios extremos físicos, químicos y ambientales.

Con base en la anterior descripción, y de acuerdo con información suministrada por Ceniflores⁸, se definieron los ponderadores presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Ponderación de las variables evaluadas en la selección de materiales promisorios para uso en CSS en Colombia⁹.

VARIABLE	PONDERADOR	
	ORGÁNICO	MINERAL
Costo del material	0,25	0,25
Disponibilidad del material	0,15	0,20
Manejo del material ⁹	0,10	0,15
Propiedades físicas	0,15	0,16
Propiedades químicas	0,10	0,12
Concentración de metales pesados	0,10	0,12
Propiedades de estabilidad	0,10	0,00
Contenido de microorganismos fitopatógenos	0,05	0,00
TOTAL	1,00	1,00

El resultado de cada una de las propiedades químicas estudiadas, se contrastó con los niveles expuestos en la Tabla 3, dándole un valor de 1 cuando se encontraba dentro del rango óptimo y de 0 cuando estaba fuera de este rango. Se promedió el valor asignado

⁸ Se realizaron reuniones con técnicos del Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana - Ceniflores y algunos productores en CSS.

⁹ El manejo hace referencia a la facilidad del uso del material en campo, si se deben hacer adecuaciones del material, o se utiliza directamente como lo suministra el proveedor. Además, incluye la facilidad o dificultad de disposición del material en las camas de siembra, esto es, que tanto esfuerzo debe hacer el operario para colocar el material en las camas.

(1 o 0) de todas las propiedades químicas y este resultado se multiplicó por su ponderador (0,1 orgánico, 0,12 mineral - Tabla 4). Este mismo procedimiento se llevó a cabo para la concentración de metales pesados.

En cuanto al contenido de microorganismos fitopatógenos, se asignó un valor de 1, cuando el microorganismo se encontraba dentro de los niveles permitidos y de 0, cuando se determinó que el contenido del microorganismo supera estos niveles¹⁰. Se promedió el valor asignado (1 o 0) de todos los microorganismos estudiados y este resultado se multiplicó por su ponderador (0,05 - Tabla 4).

El costo de cada material se contrastó con el costo de la CA, y se definió su valor ponderado (VP), así:

$$VP = \frac{\$CA}{\$M} * 0,25$$

Dónde: \$CA es el costo de la cascarilla de arroz puesto en la sabana de Bogotá, \$M es el costo del material evaluado y 0,25, es el valor del ponderador definido para la variable costo (Tabla 4).

Para las variables manejo y disponibilidad del material se asignó una calificación subjetiva, donde 1 es de fácil manejo o muy disponible y 0 es de muy difícil manejo o muy poco disponible. Este valor se multiplicó por su ponderador (0,10 orgánico, 0,15 mineral para manejo y 0,10 orgánico, 0,15 mineral para disponibilidad - Tabla 4).

Al final, se sumaron todos los resultados de los valores ponderados para cada variable. Los materiales cuyos valores ponderados se acercaron más a 1 se definieron como los más promisorios.

¹⁰ Los niveles óptimos o rangos permitidos se suministraron por el laboratorio donde se llevaron a cabo los análisis microbiológicos.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Ubicación y adquisición de materiales



Figura 1. Materiales de origen orgánico. Donde a) coco astillas; b) coco fibra; c) coco sustrato; d) palma cascarilla; e) palma fibra; f) palma tusa prensada; g) madera viruta; h) madera aserrín e i) café cisco.

Los materiales y residuos que se incluyeron en la BMR debido a su viabilidad potencial para ser usados en CSS, se seleccionaron inicialmente con base en la disponibilidad y precio del material. Algunos materiales con potencial de uso en CSS, sin embargo, no se encontraron disponibles, debido a que eran utilizados para otros procesos (abonos, concentrados, etc.). Esto hizo que los materiales que presentaran estas restricciones, tales como residuos de la industria azucarera, algodonera y cacaoera, fueran descartados para la fase de caracterización.

Se obtuvieron 21 materiales, 11 de origen orgánico (Figura 1 y Tabla 5) y nueve materiales de origen mineral (Figura 2 y Tabla 5). Se puede apreciar que de una misma actividad pueden desprenderse dos o más residuos que podrían servir como sustrato, tal es el caso del cultivo de la palma de aceite (astillas, fibra y cascarilla), el cultivo del coco (astillas, fibra y sustrato) y procesos de obtención de madera (viruta y aserrín). A pesar de esto, se dividieron en diferentes materiales debido a que, aunque varios materiales

provengan del mismo proceso de producción, sus características visuales hacían prever que sus propiedades variarían substancialmente.

Tabla 5. Inventario de materiales recolectados para la selección de materiales.

Material	Sigla	Origen	Actividad	Residuo	
Arena	AR	Mineral	Yacimiento natural y explotación minera	Minerales	
Carbón escoria fina	ECf			Combustión de carbón	
Carbón escoria mixta	ECm			Altos hornos	
Cobre escoria	CuE			Obras civiles	
Ladrillo molido	LM			Minerales	
Perlita	PE				
Piedra Pómez	PP				
Vermiculita	VE				
Zeolita	ZE				
Arroz cascarilla quemada	CA	Orgánico	Agroindustria	Quemado de cascarilla de arroz	
Café cisco	CC				
Coco astillas	AC			Mesocarpio del fruto de coco	
Coco fibra	FC				
Coco sustrato fino	SCf				
Coco sustrato grueso	SCg			Industria maderera	
Madera aserrín	AM				
Madera viruta	AV				
Palma cascarilla	CP			Agroindustria	Mesocarpio del fruto de palma de aceite
Palma fibra	FP				
Palma tuza prensada	TP				

2.4.2 Concentración total de nutrientes

Aunque en promedio los materiales tienen un pH que se encuentra dentro del rango adecuado (5,5 a 7) (Tabla 3), 7 de los 9 materiales de origen mineral (Tabla 6) y 5 de los 11 materiales de origen orgánico (Tabla 7) caracterizados presentan un pH por fuera de este rango. Llama la atención la tendencia alcalina de los sustratos cascarilla de arroz (CA) (10,15); piedra pómez (PP) (9,57), escoria de cobre (CuE) (9,15) y perlita (PE) (8,32), pues podrían generar limitantes en el proceso de absorción de elementos menores por parte de la planta (Marschner, 2012). En cuanto a la CA, los resultados concuerdan con lo reportado por Schmitz *et al.* (2002), quien afirma que el pH de este sustrato se encuentra por fuera del rango óptimo, no obstante, Quintero *et al.* (2012) encontraron que el pH de la CA mostraba una tendencia a la neutralidad. Esto puede deberse a que la CA tiene diferentes orígenes, lo que implica que sus características varíen de una fuente a otra.

De acuerdo con los valores de CE, solo dos materiales superan el rango óptimo (2 dS m^{-1}), el ladrillo molido (LM) (Tabla 7) y la tuza prensada de palma (TP) (Tabla 6) ($3,16$ y $2,63 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente), lo que indica que la mayoría de los materiales no posee una concentración de sales solubles que limite el crecimiento de las plantas. Como ya se

ha manejado con otros materiales, tales como el sustrato de coco, esta limitante puede corregirse haciendo abundantes lavados.



Figura 2. Materiales de origen mineral. Donde a) arena; b) cobre escoria; c) carbón escoria; d) perlita; e) piedra pómez; f) ladrillo molido; g) vermiculita y h) zeolita.

A excepción de la CA, todos los materiales orgánicos presentan un porcentaje de C adecuado, que concuerda con su alto contenido de materia orgánica (Tabla 6). Estos resultados coinciden con lo reportado por Schmitz *et al.* (2002) quien afirma que la CA tiene un bajo contenido de C orgánico (17%). Esta situación contrasta con la concentración de N de la CA, la cual se encuentra dentro del rango promedio de los materiales caracterizados. Los materiales cisco de café (CC), fibra de palma (FP) y TP, presentaron niveles relativamente altos de N total (0,6, 0,6 y 0,3%, respectivamente). La CA presentó la más alta concentración de P (0,45%). Al ser este N y P, totales, no están disponibles para las plantas, esta disponibilidad está asociada a las tasas de mineralización de N y P del sustrato.

Tabla 6. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen orgánico seleccionados.

Material	pH	CE	C	N	P	K	Ca	Mg	Na
		dS m ⁻¹	%						
CA	10,15	1,50	7,72	0,29	0,45	0,51	0,23	0,08	
CC	4,66	0,53	45,00	0,64	0,01	0,26	0,08	0,18	0,68
AC	6,66	0,94	45,61	0,30	0,02	0,72	0,12	0,11	7,54
FC	6,61	0,92	45,95	0,18	0,02	0,59	0,13	0,06	8,75
SCf	6,31	0,72	39,14	0,34	0,02	0,58	0,22	0,18	9,00
SCg	6,30	0,81	39,14	0,34	0,04	0,79	0,31	0,25	9,44
AM	5,43	0,77	44,85	0,30	0,01	0,22	0,21	0,05	0,70
AV	5,39	1,27	44,85	0,30	0,02	0,22	0,16	0,04	0,48
CP	4,77	1,50	45,41	0,39	0,01	0,20	0,05	0,04	0,17
FP	5,61	1,63	46,12	0,61	0,09	0,60	0,27	0,15	0,39
TP	6,92	2,63	45,01	0,53	0,09	1,42	0,18	0,10	0,75

Con respecto a la concentración total de K, Ca, Mg y Na, sobresale la alta concentración de Na de los materiales escoria de cobre (CuE) y piedra pómez (PP) (Tabla 7), no obstante, los materiales de origen mineral, sobre todo si son silicatos, tienen una muy baja solubilidad, por lo que no se espera que liberen fácilmente estos elementos a la solución del suelo, por el contrario, niveles altos de estos elementos en materiales de origen orgánico pueden llegar a ser más problemáticos, debido a su mayor solubilidad.

Tabla 7. Propiedades químicas y concentración total de nutrientes de los materiales de origen mineral seleccionados

Material	pH	CE	P	K	Ca	Mg	Na
		dS m ⁻¹	%				
AR	7,61	0,79	0,05	0,09	0,74	0,15	0,60
ECf	6,68	0,86	0,18	0,05	0,36	0,02	1,51
ECm	7,26	0,44	0,18	0,06	0,33	0,02	1,22
CuE	9,15	0,23	0,13	0,13	0,52	0,16	23,23
LM	7,29	3,16	0,01	0,20	0,12	0,02	4,42
PE	8,32	0,02	0,01	13,17	0,14	4,09	1,00
PP	9,57	0,71	0,01	0,12	0,11	0,09	11,54
VE	6,70	0,05	0,05	0,09	0,16	2,27	
ZE	8,11	0,09	0,01	0,15	1,32	0,30	19,21

Aunque tradicionalmente no se busca que un sustrato sirva de suministro de nutrientes para las plantas, al realizar programas de fertirriego es conveniente saber como afecta la concentración de estos nutrientes, tanto en fase soluble como intercambiable, el desarrollo de las plantas, además de que la concentración total de elementos podría alertar sobre posibles toxicidades. A ese respecto, sobresale la concentración de Zn de la CuE (27.994,7 mg Kg⁻¹) y de Fe de la vermiculita (VE) (23.968,8 mg Kg⁻¹) (Tabla 10). Como se muestra en la Tabla 3, el Zn puede considerarse como metal pesado, y llegar a ser tóxico cuando sobrepasa los 365 mg Kg⁻¹ para sustratos minerales. Es evidente que

la CuE supera con creces este rango, por lo que es necesario tener en cuenta su alta concentración.

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre los cationes totales e intercambiables presentes en los materiales seleccionados.

		TOTAL				INTERCAMBIABLE			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
TOTAL	K	1,00	-0,17	0,99 ***	-0,18	-0,13	-0,15	-0,16	-0,14
	Ca		1,00	-0,09	0,51 **	-0,32 *	0,77 ***	-0,03	0,58 **
	Mg			1,00	-0,12	-0,18	-0,08	-0,19	-0,10
	Na				1,00	0,00	0,48 *	0,08	0,62 **
INTERCAMBIABLE	K					1,00	-0,05	0,85 ***	0,29
	Ca						1,00	0,25	0,87 ***
	Mg							1,00	0,46 *
	Na								1,00

*** (P<0,01); ** (P<0,05); * (P<0,1).

Tabla 9. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen orgánico seleccionados.

Material	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	mg kg ⁻¹				
CA	486,5	331,4	6,9	28,9	6,3
CC	8674,3	163,2	4,1	66,3	8,0
AC	188,2	9,3	3,1	77,2	23,9
FC	236,9	10,6	6,4	17,9	1,6
SCf	2052,1	20,7	3,3	18,8	3,5
SCg	3726,3	23,1	3,4	14,7	18,6
AM	127,1	25,6	0,2	70,2	5,1
AV	60,3	18,9	3,4	39,4	3,5
CP	143,9	23,4	1,4	6,8	1,2
FP	513,4	129,0	7,9	24,4	1,9
TP	279,3	161,8	23,1	26,0	2,5

2.4.3 Caracterización de las propiedades de intercambio

A pesar de que los materiales CuE y PP presentan una alta concentración de Na total (23,2 y 11,5%, respectivamente) (Tabla 7), esta no corresponde con los niveles de Na⁺ intercambiabile (Tabla 12), pues se encuentran dentro del rango adecuado. La concentración total de un determinado elemento no refleja necesariamente su concentración en fase intercambiabile y/o soluble, es decir, su disponibilidad para ser

absorbida por las raíces de la planta. Sin embargo, para el caso del Na y el Ca, se observó una correlación altamente significativa entre su concentración total y en fase soluble (Tabla 8). Esto sugiere que la tasa de meteorización de estos cationes debe tenerse en cuenta, pues puede generar problemas de antagonismo con K y Mg.

Tabla 10. Concentración total de micronutrientes en los materiales de origen mineral seleccionados.

Material	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	mg kg ⁻¹				
AR	1803,7	182,0	5,6	48,0	9,8
ECf	2324,9	47,1	10,9	14,0	23,0
ECm	1426,0	32,7	8,9	12,0	12,6
CuE	2569,9	1871,1	2717,1	27994,7	58,3
LM	1408,5	223,6	2,0	9,5	5,2
PE	7284,9	137,4	5,3	41,2	6,3
PP	537,9	38,1	5,0	17,4	3,3
VE	23968,8	390,2	20,7	37,8	79,5
ZE	890,0	224,5	10,7	37,8	3,8

La capacidad de intercambio catiónico obtenida con acetato de amonio a pH 7 (CIC) osciló entre 1,7 (CuE) y 120,7 cmol_c Kg⁻¹ (SCg) (Tabla 11 y Tabla 12). Los valores son los esperados, con una CIC alta en los sustratos orgánicos, y una CIC baja en los sustratos minerales más inertes como la arena (AR) y las escorias de carbón (EC) y cobre (CuE). La CIC de la vermiculita (VE) y zeolita (ZE), silicatos cristalinos que presentan sustitución isomórfica, es la más alta de los sustratos minerales. De acuerdo con los niveles óptimos de CIC (Tabla 3), se puede afirmar que los materiales de origen mineral VE y ZE, y todos los materiales de origen orgánico, a excepción de la CA (7,05 cmol_c Kg⁻¹), presentan una buena capacidad para retener cationes. Al igual que en este estudio, Kroeff *et al.* (2004), reporta baja CIC en la cascarilla de arroz quemada (8,5 cmol_c Kg⁻¹), en contraste con Quintero *et al.* (2011), quienes hallaron valores entre 25,5 y 32,5 cmol_c Kg⁻¹. La baja CIC de la CA coincide con su baja concentración de carbono total (Tabla 6), la cual es una medida de la presencia de moléculas orgánicas, que a su vez son las que aportan la CIC.

Si se compara la CIC obtenida con acetato de amonio 1M, que es una solución tampón que modifica el pH al cual se hace la determinación, con la CIC efectiva (CICE) estimada por suma de cationes intercambiables, se observa que los valores son mucho más altos. En los sustratos orgánicos la CICE es mucho menor, con excepción de CA y CP. En estos materiales orgánicos, la CIC se genera a partir de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas, como la celulosa, hemicelulosa y lignina (Quintero *et al.*, 2011). La CICE se considera la CIC determinada al pH real del material, y las diferencias entre ambas medidas debe estar relacionada con la desprotonación de grupos funcionales como respuesta al aumento de pH del material al entrar en contacto con el acetato de amonio a pH 7, lo cual genera cargas variables en función del pH. La ZE, al contrario, muestra una CICE mucho más alta que la CIC obtenida con acetato de amonio, que podría indicar que se está solubilizando el Ca estructural del mineral, lo cual se refleja en el alto valor de Ca total y principalmente del intercambiable medidos, que indica que la CICE de la ZE esta siendo sobreestimada (Jaramillo, 2014). Cabe aclarar, que las

superficies de las partículas de los sustratos pueden llevar cargas permanentes y/o variables (Silber, 2008).

Tabla 11. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales orgánicos seleccionados.

Material	CIC	CICE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
	cmol _c Kg ⁻¹					
CA	7,1	10,6	1,4	7,3	1,9	0,2
CC	25,0	14,6	4,5	6,9	3,0	0,1
AC	77,3	44,0	21,6	5,9	10,0	6,5
FC	42,4	31,2	14,3	6,2	4,5	6,3
SCf	74,7	40,4	13,0	9,7	11,2	6,5
SCg	120,7	48,1	14,3	12,4	13,8	7,5
AM	23,4	13,5	3,3	6,7	3,3	0,3
AV	36,8	14,1	4,0	6,7	3,2	0,2
CP	10,5	10,0	5,0	1,8	3,2	0,1
FP	57,8	35,5	17,5	4,6	13,3	0,2
TP	23,5	11,7	3,5	2,9	5,0	0,3

Tabla 12. Caracterización del complejo de intercambio catiónico de los materiales minerales seleccionados.

Material	CIC	CICE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
	cmol _c Kg ⁻¹					
AR	2,8	2,0	0,1	1,3	0,6	0,1
ECf	4,2	5,3	0,1	4,5	0,5	0,3
ECm	3,1	6,9	0,1	5,9	0,5	0,3
CuE	1,7	1,1	0,2	0,6	0,2	0,2
PE	8,4	3,1	0,6	1,8	0,5	0,2
PP	6,2	8,4	0,5	4,4	0,6	3,0
VE	27,3	19,6	0,2	1,3	18,1	0,1
ZE	23,0	75,8	1,0	52,0	6,2	16,6

Los materiales provenientes del cultivo de coco presentaron la mayor concentración de K⁺ (Tabla 11). En cuanto al Ca²⁺, la ZE contenía la mayor concentración (Tabla 12), seguido del sustrato de coco grueso (SCg) (Tabla 11). La VE contiene la mayor concentración de Mg²⁺, seguido de SCg, fibra de palma (FP) y sustrato de coco fino (SCf). La ZE y los materiales provenientes del cultivo de coco tienen la mayor concentración de sodio (Na⁺), que se corrobora con lo expuesto por Jenagathan (1992). Los resultados presentados en la Tabla 11 y Tabla 12 sugieren que un número importante de materiales, tanto de origen mineral, como de origen orgánico, presentan una concentración de cationes intercambiables que debe tenerse en cuenta en programas de fertirriego. De igual forma, los materiales que cuentan con una CIC elevada (> 20 cmol_c Kg⁻¹) podrían generar condiciones adecuadas de adsorción de cationes en el mediano y largo plazo, lo cual es conveniente en el manejo integrado del riego y la fertilización (MIRFE), ya que nutrientes como K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y NH₄⁺ pueden permanecer en el complejo de cambio, para luego ser liberados a la solución del sustrato y así ser absorbidos por las plantas (Silber, 2008).

2.4.4 Concentración de metales pesados

El material escoria de cobre (CuE) tiene una concentración de Co y Pb que está por encima del rango permitido (Tabla 3), de igual forma, la vermiculita (VE) presenta una concentración de Cr por encima de este rango (Tabla 14). Moral *et al.* (1994) enuncia que metales como Cd puede generar antagonismos con el P, K⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ y Zn²⁺ cuando se encuentran en el complejo de cambio y/o en la solución del sustrato, lo que limita la absorción de estos nutrientes. De igual forma, altas concentraciones de metales pesados en la solución del sustrato pueden provocar la disminución del crecimiento de las plantas que se desarrollan en él (Sánchez *et al.*, 1999), debido a que algunos de estos metales tienen alta movilidad dentro de la planta, lo que limita la translocación de elementos esenciales (Marschner, 2012), ya que según Hall (2009), la toxicidad por metales pesados puede resultar de la unión de los metales a los grupos sulfidrilos de las proteínas, conduciendo a la inhibición de su actividad o la disrupción de su estructura, o del antagonismo de un elemento esencial, provocando su deficiencia.

Tabla 13. Concentración de metales pesados de cada material de origen orgánico recolectado.

Material	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Se
	mg kg ⁻¹				µg kg ⁻¹		
CC	0,0	2,1	0,0	4,2	0,5	3,1	0,01
AC	0,0	0,1	0,2	2,1	11,0	5,2	0,01
SCf	0,5	12,6	0,4	5,9	34,9	46,8	0,02
AM	0,0	0,1	0,2	2,1	11,0	5,2	0,01
AV	0,0	1,9	0,0	13,3	10,5	3,8	0,01
CP	0,4	1,2	0,1	48,3	9,3	10,0	0,01
TP	0,5	1,8	0,3	66,8	7,5	6,5	0,01

Tabla 14. Concentración de metales pesados de cada material de origen mineral recolectado.

Material	Co	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Se
	mg kg ⁻¹				µg kg ⁻¹		
AR	2,4	2,5	0,3	25,5	12,0	138,0	0,02
ECf	0,4	1,4	0,2	1,8	23,4	6,4	0,01
ECm	0,4	1,4	0,2	1,8	23,4	6,4	0,01
CuE	461,0	3870,0	2,0	163,0	24,5	1,8	0,01
LM	2,2	3,6	0,0	22,0	14,3	3,4	0,01
PE	0,8	10,1	0,0	2,4	28,0	4,2	0,01
PP	0,6	1,7	0,0	1,3	0,0	13,8	0,02
VE	36,5	1,9	0,0	728,0	7,6	2,2	0,02
ZE	1,2	3,0	0,0	3,1	45,2	45,9	0,01

La concentración de metales pesados que se muestran en la Tabla 13 y Tabla 14 es total, y no necesariamente se puede asociar con altos niveles de estos metales en el complejo de cambio o en la solución del sustrato. Sin embargo, se presume que aquellos materiales que tienen altas concentraciones de uno o varios metales pesados, presentarían un riesgo de liberar estos elementos al complejo de cambio, una vez entren en contacto con agua y con los exudados presentes en la rizósfera. Castaldi y Melis (2004) no encontraron diferencias significativas en cuanto a la concentración de Pb, Cd, Zn, Cr y Cu en los sustratos y el tejido vegetal, aun cuando los sustratos evaluados

contenían concentraciones iniciales variables (altas y bajas) de estos metales; aunque ninguno superaba los rangos reportados en la Tabla 3.

De acuerdo con los límites reportados en la Tabla 3, todos los materiales de origen orgánico presentan una concentración de metales pesados dentro del rango permitido, lo que los hace viables para ser usados en CSS (Tabla 13).

2.4.5 Propiedades físicas

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 15 y Tabla 16, los materiales que superarían el rango óptimo de densidad aparente (D_p) ($0,6 \text{ g cm}^{-3}$) son: CuE, ladrillo molido (LM), ZE y AR, con 1,22, 0,98, 0,79 y $0,65 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Como lo menciona Quintero *et al.* (2012), las diferencias en D_p son muy importantes para el diseño del contenedor, pues esta propiedad determinará las condiciones de resistencia mecánica en las estructuras de las camas de cultivo. Con base en esto, se podría afirmar que las camas de cultivo requerirán de soportes más resistentes si se desea utilizar estos materiales, sobre todo para el caso de la CuE y el LM (Tabla 16). De igual forma, el manejo de estos dos materiales requeriría un mayor esfuerzo por parte de los operarios de cultivo.

Tabla 15. Análisis físico de los materiales de origen orgánico recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.

Material	D_p	D.Re	P.T	CRH (%)			Granulometría		
	g cm^{-3}		%	0,33 bar	5 bar	15 bar	> 8 mm	2-8 mm	< 2 mm
CA	0,12	2,02	94,1	33,81	30,84	27,80	0,60	75,50	23,90
CC	0,11	1,91	94,2	39,90	33,67	29,99	0,00	74,80	25,20
AC	0,10			216,36	189,74	127,11	78,20	19,30	2,50
FC	0,13			216,36	189,74	127,11	0,00	0,00	100,00
SCf	0,11	1,23	91,1	372,31	332,78	314,08	2,20	11,00	86,80
SCg	0,10			283,46	282,69	244,15	8,20	18,10	73,70
AM	0,16	1,86	91,4	87,93	76,96	59,32	0,40	2,90	96,70
AV	0,15	1,55	90,3	119,85	102,84	105,56	74,10	23,40	2,50
CP	0,14	1,34	89,6	32,77	34,12	34,30	32,80	62,70	4,50
FP	0,21			150,64	117,14	70,33	69,30	14,00	16,70
TP	0,25	1,36	81,6	190,58	145,07	109,08	0,00	0,00	100,00

Todos los materiales caracterizados presentan una alta porosidad total (P.T), > 60%, lo cual sugiere que las raíces de las plantas podrían crecer sin dificultad y tendrían las condiciones adecuadas para el suministro de agua y oxígeno. Sería necesario determinar la distribución del tamaño de los poros para corroborar esta hipótesis completamente, pues si estos son demasiado grandes, la porosidad estará principalmente ocupada por aire, pudiendo llegar a ser insuficiente la cantidad de agua retenida (Ansorena, 1994).

A excepción de CA, cisco de café (CC), cascarilla de palma (CP) y aserrín de madera (AM), la mayoría de los materiales de origen orgánico presenta una capacidad de retención de agua (CRH) mayor a 100% a 0,33 bar de presión (Tabla 15), lo cual indica una muy buena CRH. De los materiales de origen mineral, tan solo la VE presenta una

CRH mayor al 100% a 0,33 bares de presión (Tabla 16), que al igual que con los materiales orgánicos, concuerda con la relación PV utilizada para obtener su extracto de saturación (1:5). Las vermiculitas son arcillas expansivas (Velde y Meunier, 2008) que tienen la capacidad de hidratarse, lo cual les confiere una alta capacidad de retención de humedad (Jaramillo, 2014). En el otro extremo, los materiales de origen mineral, CuE, AR y ZE mostraron los valores más bajos de CRH, con 0,02, 2,5 y 7,5 % a 0,33 bares de presión (Tabla 16).

En cuanto a la granulometría, a excepción de fibra de palma (FP), viruta de madera (AV), astillas de coco (AC) y piedra pómez (PP), todos los materiales contenían tamaños de partícula menor a 8mm. De acuerdo con Ansorena (1994), los sustratos deben presentar una granulometría de 0,25 a 2,5 mm para ser utilizados en campo (Tabla 3). Cabe resaltar, que los materiales recolectados tienen la posibilidad de ajustar su granulometría por medio de procesos de molienda, y algunos como la PP, PE y ZE son suministrados por el proveedor con la granulometría deseada.

Tabla 16. Análisis físico de los materiales de origen mineral recolectados. D_p = Densidad aparente; D. Re = Densidad Real; P.T = Porosidad total y CRH = Capacidad de retención de humedad.

Material	D_p	D.Re	P.T	CRH (ml 100g ⁻¹)			Granulometría		
	g cm ⁻³	%	%	0,33 bar	5 bar	15 bar	> 8 mm	2-8 mm	< 2 mm
AR	0,65	2,25	71,1	2,46	1,80	1,29	2,10	25,70	72,20
ECf	0,55	1,65	66,7	12,65	5,71	7,53	0,00	32,80	67,20
ECm	0,51			11,95	6,25	8,47	35,60	40,60	23,80
CuE	1,22	2,42	49,6	0,02	0,03	0,23	0,00	1,50	98,50
LM	0,98	2,68	63,4	19,22	16,78	11,59	33,80	48,30	17,90
PE	0,32	1,82	82,4	47,62	45,95	38,57	3,50	85,10	11,40
PP	0,31	1,91	83,8	75,18	60,45	50,42	52,10	38,70	9,20
VE	0,11	1,31	91,6	283,99	270,36	233,50	0,50	81,50	18,00
ZE	0,79	2,19	63,9	7,49	7,14	6,22	0,00	81,40	18,60

2.4.6 Propiedades de estabilidad

De acuerdo con el fin del sustrato, cultivo comercial o vivero, la estabilidad toma relevancia o es insignificante, puesto que por ejemplo, en procesos de plantulación los ciclos no tardan más de 30 días, mientras que cultivos como clavel tienen un ciclo de producción de dos años, tiempo en el cual se requiere que el sustrato no pierda sus propiedades. De acuerdo con esto, el productor en CSS definirá si las propiedades de estabilidad expuestas en este trabajo tienen relevancia para su sistema de producción.

La relación carbono – nitrógeno (C/N) es un indicador del origen, madurez y estabilidad del material orgánico (Abad *et al.*, 2002). En ese sentido, a excepción de la CA (26,9) todos los materiales de origen orgánico presentan una relación C/N mayor a 40 (Tabla 17), que se definió como adecuada para sustratos de origen orgánico (Tabla 3), lo cual obedece principalmente a su alto contenido de C y bajo contenido de N (Tabla 6).

Aunque esta alta relación C/N puede conllevar a una inmovilización del N soluble (Abad *et al.*, 2002), el déficit de N puede ser suplido en el MIRFE (Noguera *et al.*, 2000). En todos los materiales orgánicos el C se encuentra en forma de celulosa y lignina¹¹ principalmente, y en menor porcentaje en forma de hemicelulosa (Tabla 17). Esta condición puede hacer que los materiales sean más resistentes a la degradación microbiana (Abad *et al.*, 2002).

Tabla 17. Propiedades de estabilidad de los materiales de origen orgánico recolectados.

Material	C/N	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	SiO ₂	Mat Seca
		%				
CA	26,9	32,1	38,4	23,2	26,9	85,2
CC	70,3	10,8	54,0	23,8	0,1	90,8
AC	152,0	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
FC	255,3	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
SCf	115,1	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
SCg	115,1	3,7	61,1	26,2	14,1	36,4
AM	149,5	1,2	56,8	28,6	5,1	78,3
AV	149,5	7,7	50,6	27,4	1,7	87,5
CP	116,4	11,7	33,1	51,0	2,0	86,6
FP	75,6	10,5	28,1	41,5	4,8	74,5
TP	84,9	6,1	47,1	23,0	2,3	64,1

La concentración de óxido de silicio (SiO₂) en la CA está por encima del 25% (Tabla 17), que concuerda con lo encontrado por Johar *et al* (2012) y Yalçin y Sevinç (2001). Este porcentaje de SiO₂ de la CA (26,9) supera en 48% al material más próximo, sustrato de coco fino (SCf) (14,1%). Cabe recordar, que es precisamente por el contenido de Si que se le atribuye a la cascarilla de arroz su gran resistencia a la degradación (Quintero *et al.*, 2006).

2.4.7 Propiedades microbiológicas

A excepción de la viruta de madera (AV) y el aserrín de madera (AM), todos los materiales de origen orgánico dieron negativo para hongos fitopatógenos. Estos dos materiales presentan 480 unidades formadoras de colonia (UFC) de *Fusarium Solani* por g del material (Tabla 18). En cuanto a la concentración de bacterias fitopatógenas, todos los materiales presentaron *Pseudomonas sp*, las cuales se encuentran comúnmente en materiales orgánicos. No hubo presencia de nematodos fitopatógenos, coliformes y *E Coli*.

Aunque la mayoría de los materiales de origen orgánico se encuentran libres de organismos fitopatógenos o contaminantes, es conveniente realizar su desinfección previa a su uso en campo, pues de acuerdo con su condición, es natural que pueda contaminarse.

¹¹ La lignina es un polisacárido altamente resistente a la degradación microbiana (Jaramillo, 2014)

Tabla 18. Análisis microbiológico de los materiales orgánicos.

Material	Hongos	Bacterias	Nemátodos	Coliformes	E. Coli
	UFC g ⁻¹		géneros en 100g	NMP g ⁻¹	
CC	(-)	14 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
AC	(-)	2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
FC	(-)	2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
SCf	(-)	2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
SCg	(-)	2 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
AM	480 <i>Fusarium solani</i>	49 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
AV	480 <i>Fusarium solani</i>	49 X 10 ⁴ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
CP	(-)	67 X 10 ³ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
FP	(-)	4 X 10 ³ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)
TP	(-)	32 X 10 ⁵ : <i>Pseudomonas sp</i>	(-)	(-)	(-)

(-) = Negativo

2.4.8 Costo, manejo y disponibilidad

De todos los materiales evaluados, el LM es el más económico, pues es fácil conseguirlo de obras civiles en construcción, simplemente se debe pagar el transporte. No obstante, hay que acondicionarlo a la granulometría adecuada, pues viene en diversos tamaños y es común que en el proceso de acondicionamiento se desintegre hasta convertirse en polvo, razón por la cual su manejo y disponibilidad son bajos (0,2 y 0,5/1,0) (Tabla 20).

Tabla 19. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen orgánico recolectados en la caracterización y selección de materiales.

Material	Costo \$ * m ³	Manejo	Disponibilidad
CA	42.000	0,8	1,0
CC	90.000	0,9	0,2
AC	150.000	0,4	1,0
FC	150.000	0,3	1,0
SCf	150.000	0,9	1,0
SCg	150.000	0,9	1,0
AM	90.000	1,0	0,6
AV	90.000	1,0	0,6
CP	45.000	0,8	1,0
FP	70.000	0,4	1,0
TP	70.000	0,3	1,0

Fuente Costo: Proveedores de los materiales. Manejo y disponibilidad: Resultados del proceso de ponderación.

La ZE es el material más costoso (Tabla 20) y su manipulación en campo se complica debido a su alta D_p (Tabla 16). Los materiales AM y AV son los más fáciles de manejar (1,0/1,0) (Tabla 20), ya que: 1) son residuos a los que no se les debe realizar ningún proceso mecánico o físico para adecuarlos a su uso en campo y 2) su baja D_p permite manipularlos fácilmente (Tabla 15). Los materiales LM, CuE, FC y TP son los de más difícil manejo, debido a que son los que más adecuaciones requiere y/o su peso complica

su manipulación en campo. En cuanto a la disponibilidad, los materiales ECf, PE, PP, VE, ZE, CA, AC, FC, SCf, SCg, CP, FP y TP son los más disponibles (1,0/1,0), ya que se pueden obtener en grandes cantidades, desde sus lugares de origen. Por el contrario, los materiales CuE y CC (0,2/1,0) no cuentan con la disponibilidad suficiente para ser utilizados en grandes volúmenes (Tabla 19 y Tabla 20).

Tabla 20. Costo (Año 2014), manejo y disponibilidad de los materiales de origen mineral recolectados en la caracterización y selección de materiales.

Material	Costo \$ * m ³	Manejo	Disponibilidad
AR	35.000	0,7	0,5
ECf	24.000	0,8	1,0
ECm	24.000	0,5	0,8
CuE	340.000	0,3	0,2
LM	20.000	0,2	0,5
PE	459.000	0,9	1,0
PP	449.000	0,9	1,0
VE	176.000	0,9	1,0
ZE	1.500.000	0,8	1,0

Fuente Costo: Proveedores de los materiales. Manejo y disponibilidad: Resultados del proceso de ponderación.

2.4.9 Priorización de materiales a partir de la BMR

2.4.9.1 Priorización de materiales de origen orgánico

Los materiales de origen orgánico sustrato de coco fino (SCf), sustrato de coco grueso (SCg), fibra de palma (FP), astillas de coco (AC) y fibra de coco (FC) obtuvieron la máxima puntuación (0,1/0,1) (Figura 3) de acuerdo con sus propiedades químicas (Tabla 6 y Tabla 11). Con respecto al mismo parámetro, los materiales que obtuvieron la menor puntuación fueron: cisco de café (CC) y cascarilla de palma (CP), con 0,03 y 0,05/0,1 puntos, respectivamente. Con respecto a la concentración de metales pesados (Tabla 13), todos los materiales de origen orgánico tuvieron una puntuación mayor o igual a 0,09/0,1. De acuerdo con las propiedades de estabilidad (Tabla 17), la CA obtuvo la mayor puntuación (0,08/0,1), debido a su alto contenido de lignina y SiO₂; CP obtuvo la segunda puntuación (0,07/0,1), debido a su alto contenido de lignina y materia seca; la tuza prensada de palma (TP) obtuvo la menor calificación (0,04/0,1) por su bajo contenido de SiO₂. A excepción de los materiales aserrín de madera (AM) y aserrín de viruta (AV) (0,04/0,05), todos obtuvieron una calificación de 0,05/0,05 en sus contenidos de microorganismos fitopatógenos, esto debido a que tanto AM como AV dieron positivo para presencia de *Fusarium solani* (Tabla 18). De acuerdo con su baja densidad aparente, alta capacidad de retención de humedad y adecuada granulometría, todos los materiales obtenidos a partir de la producción de coco mostraron las mejores propiedades físicas (Tabla 15), así: SCf (0,15/0,15); SCg (0,13/0,15); AC y FC (0,12/0,15); los materiales CC, CP y AC presentaron la menor calificación (0,08/0,15), debido a su baja capacidad de retención de humedad. Según el costo (Tabla 19), los materiales de origen orgánico con la mejor puntuación son CA (0,12/0,25) y CP

(0,11/0,25); los que presentaron la menor puntuación fueron los provenientes del cultivo de coco, AC, FC, SCf y SCg, con 0,03/0,25 puntos. Los materiales AM y AV presentaron la mejor puntuación para la variable manejo (Tabla 19), con 0,1/0,1 puntos; los materiales FC y TP presentaron el puntaje más bajo, con 0,03/0,1. Cabe recordar, que este manejo tiene que ver con la adecuación que se le debe dar al material previo a su ubicación en las camas de siembra y la facilidad de manipulación para esta ubicación. Los materiales AM y AV vienen listos para ser ubicados en las camas, y dadas sus características son de fácil manipulación. Con respecto a la disponibilidad (Tabla 19), los materiales AC, CP, SCf, AM y AV presentaron la mejor puntuación (0,15/0,15). El material CC es el menos disponible (0,2/0,15). Es conveniente aclarar, que esta disponibilidad hace referencia no solo a que el material exista, si no que se encuentre en las cantidades que requiere el mercado. De acuerdo con su puntuación total, los mejores materiales son: sustrato de coco, cascarilla de palma y cascarilla de arroz (Figura 3).

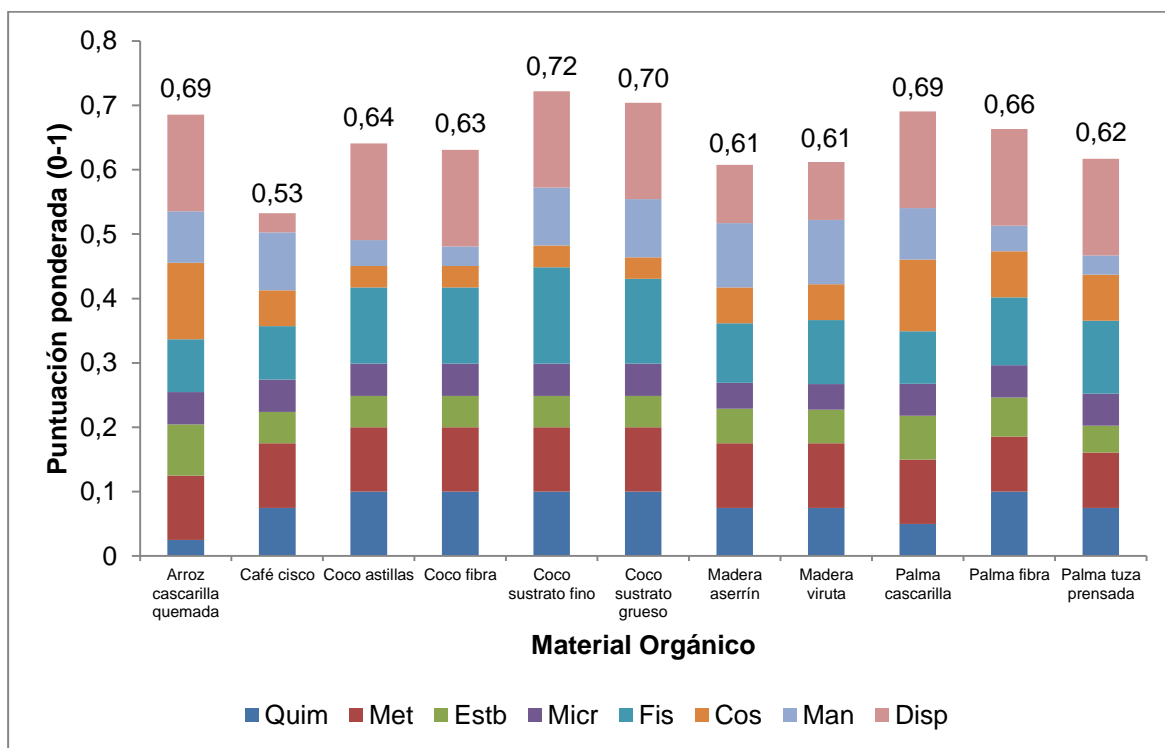


Figura 3. Resultados de la calificación de cada material de origen orgánico caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Estb = Propiedades de estabilidad; Micr = Propiedades microbiológicas; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.

2.4.9.1 Priorización de materiales de origen mineral

De acuerdo con sus propiedades químicas (Tabla 6 y Tabla 11), los materiales de origen mineral escoria de carbón fino (ECf) y zeolita (ZE) obtuvieron la mejor puntuación (0,08/0,12) (Figura 4). Con respecto al mismo parámetro, el material que obtuvo la menor puntuación fue el ladrillo molido (LM), con 0,001/0,12 puntos. Con respecto a la

concentración de metales pesados (Tabla 13), a excepción de vermiculita (VE) (0,10/0,12) y escoria de cobre (CuE) (0,09/0,12) quienes presentaron altas concentraciones de Cr, y Co y Pb, respectivamente, todos los demás materiales obtuvieron la máxima puntuación (0,12/0,12), lo que indica que su concentración de metales pesados se encontraba dentro del rango adecuado (Tabla 3 y Tabla 13).

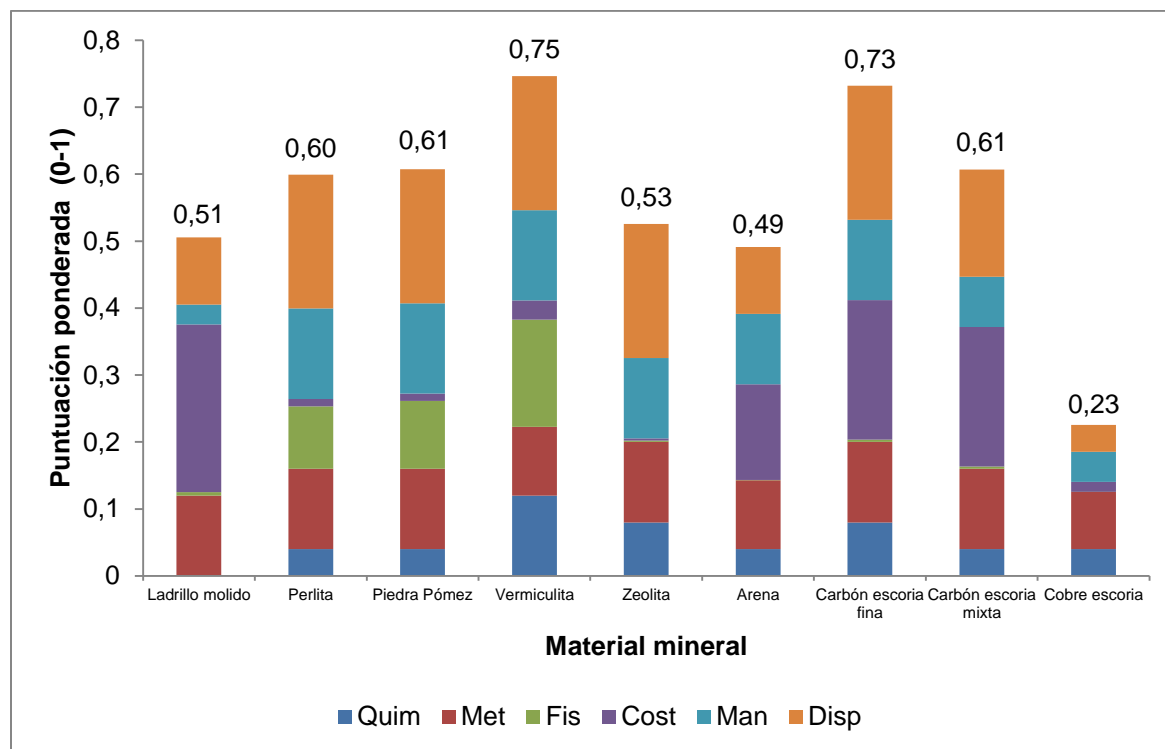


Figura 4. Resultados de la calificación de cada material de origen mineral caracterizado, de acuerdo con los ponderadores definidos para cada grupo de variables. Donde: Quim = Propiedades químicas; Met = Metales pesados; Fis = Propiedades físicas; Cos = Costo; Man = Manejo y Disp = Disponibilidad.

De acuerdo con su baja densidad aparente, alta capacidad de retención de humedad y adecuada granulometría (Tabla 15), la VE obtuvo la mejor puntuación (0,16/0,16) para propiedades físicas; los materiales ZE, arena (AR) y CuE presentaron la menor calificación (0,00/0,16), debido a su alta densidad aparente y baja capacidad de retención de humedad. Según el costo (Tabla 19), los materiales con la mejor puntuación son ladrillo molido (LM) (0,25/0,25), ECf y escoria de carbón mixto (ECm) (0,21/0,25). Con respecto a esta variable, la ZE presentó la menor puntuación (0,00/0,25).

Los materiales VE, PP y PE presentaron la mejor puntuación para la variable manejo (Tabla 19), con 0,14/0,15 puntos; el material LM presentó el puntaje más bajo, con 0,03/0,15. Los materiales VE, PP y PE vienen listos para ubicar en las camas, y dadas sus características son de fácil manipulación. Con respecto a la disponibilidad (Tabla 19), los materiales ECf, PE, PP, VE y ZE presentaron la máxima puntuación (0,20/0,20). El material CuE es el menos disponible (0,04/0,20). De acuerdo con su puntuación total, los mejores materiales son: VE, EC, PP, PE y ZE (Figura 4).

2.1 Conclusiones

Existe un número considerable de materiales cuyas propiedades los harían promisorios para ser implementados en sistemas de cultivo sin suelo en Colombia, es así como se obtuvieron 21 materiales, 11 de origen orgánico y nueve de origen mineral. Y dadas sus características químicas, físicas, de estabilidad, microbiológicas, gran disponibilidad y bajo costo, se concluye que los materiales de origen orgánico, sustrato de coco y cascarilla de palma, y de origen mineral: escoria de carbón, piedra pómez, perlita, vermiculita y zeolita tienen un gran potencial para complementar o reemplazar el uso de cascarilla de arroz. Esto concuerda con la tendencia mundial, donde, a excepción de la cascarilla de palma y la escoria de carbón, todos los materiales son ampliamente utilizados como medio de cultivo.

3. Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales

3.1 Resumen

Se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75, sobre las propiedades químicas pH, CE y CIC, la concentración de iones en fase soluble: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y fase intercambiable: Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y la concentración de micronutrientes disponibles: Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} , tanto en estado natural, sin contacto con raíces, agua o nutrientes externos y en fase de cultivo (muestreos a los 7 y 24 ddt) mediante la propagación de esquejes de clavel, para lo cual se evaluó la ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz). Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3) + 8$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Los resultados muestran que la concentración de sales disminuye y la reacción del sustrato se hace más ácida cuando estos se comparan en estado natural con su estado en fase de cultivo. Así mismo, el SC y la VE mostraron la mayor CIC, que concuerda con el mayor Pf.Raíz. No se aprecian diferencias significativas entre los 7 y los 24 ddt, aunque si se aprecian diferencias entre la fase cultivo y la fase en estado natural, concerniente principalmente a la reducción de la concentración de iones en estado soluble e intercambiable. Los sustratos presentan actividad química que debe tenerse en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización.

Palabras Clave: Actividad química, adsorción, desorción, acidez, salinidad.

3.2 Introducción

Los estudios sobre las propiedades químicas de los sustratos están orientados a conocer la concentración de elementos nutrientes, a verificar si el sustrato contiene altas concentraciones de elementos que puedan ser perjudiciales para la planta (por ejemplo Na) y a determinar la concentración de metales pesados (Block *et al.*, 2008). Generalmente estos estudios son establecidos previamente a su uso para crecimiento de plantas, por lo tanto se abordan fases sólidas, homogéneas, sin alterar (Tabla 3). No obstante, a través del periodo de crecimiento de las plantas, componentes orgánicos son secretados desde las plantas o como resultado de los procesos de descomposición acumulada (Tate y Theng, 1980; Huang y Violante, 1986; Tan, 1986; Silver y Raviv,

1996). Es así, como las superficies de los nuevos sólidos formados se vuelven heterogéneas y las propiedades químicas de la mezcla pueden ser significativamente diferentes de aquellas encontradas en la caracterización del material individual (Silver y Raviv, 1996).

Las propiedades químicas del sustrato ideal propuesto por Abad *et al.*, (2001) corresponden a: pH = 5,2 – 6,3; conductividad eléctrica: 0,75 – 3,49 dS m⁻¹=; materia orgánica: > 80%; nitrato: 100 – 199 mg L⁻¹; potasio: 150 – 249 mg L⁻¹; sodio: =< 115 mg L⁻¹; cloro: =< 180 mg L⁻¹ y sulfato: =< 960 mg L⁻¹.

El objetivo del presente capítulo es caracterizar la fase soluble e intercambiable de los materiales de origen orgánico: sustrato de coco (SC), cascarilla de palma (CP) y cascarilla de arroz (CA), y de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), priorizados a partir de los resultados del capítulo dos, mezclados en diferentes proporciones orgánico-mineral.

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Localización y material vegetal

La investigación se estableció en las instalaciones de la empresa Flores Aurora SAS, ubicada en el municipio de Suesca (Cundinamarca), en las coordenadas 05°03'740' latitud norte y 73°,50'201 longitud este, con una altura de 2.584 msnm y una temperatura promedio de 14°C. El experimento se estableció en un invernadero tipo capilla, que se adaptó para que permaneciera como cámara húmeda, manteniendo unas condiciones internas de humedad relativa (HR) mayores al 80 % y una temperatura promedio de 30°C.

Se utilizaron esquejes de clavel (*Dianthus caryophyllus*), variedad Pomodoro, evaluados durante un ciclo de enraizamiento (24 días). Se escogió esta especie y en esta etapa del proceso de producción, debido a su afinidad con la producción en CSS, a su rápido ciclo de producción y al hecho de que en esta etapa no se aplican fertilizantes. De este modo, se puede conocer la facilidad de enraizamiento de los esquejes, sembrados en un amplio rango de materiales y mezclas; y el comportamiento de las mezclas en un sistema sustrato planta.

3.1.2 Diseño experimental y de tratamientos

3.1.2.1 Caracterización de sustratos en crudo

La primera fase del experimento consistió en la evaluación química de los sustratos, previa a su implementación en campo (con plantas). En esta fase inicial se estableció un diseño experimental sin repeticiones, denominado *screening* o barrido, debido a que en esta fase los sustratos no tuvieron contacto con agua, con raíces de plantas, o con soluciones fertilizantes, que puedan alterar significativamente sus propiedades y composición química. Cada tratamiento fue definido como una mezcla entre un material

de origen orgánico (MO) y un material de origen mineral (MM) así: MO: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) o sustrato de coco (SC) mezclado con un MM: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) o zeolita (ZE). Cada combinación se evaluó en tres proporciones (MO:MM): 75:25; 50:50 y 25:75. También se estudió la proporción 100:0 y 0:100. Las mezclas resultantes en adelante se denominarán “sustratos”.

3.1.2.2 Caracterización de sustratos en cultivo



Figura 5. Evaluación de la propagación de esquejes de clavel var. Pomodoro en condiciones de invernadero, en los diferentes sustratos evaluados.

Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado (3X5X(3)+8), con tres factores: factor 1 – (MO), con 3 niveles (CA, CP y SC); factor 2 – (MM); con 5 niveles (EC, PE, PP, VE y ZE) y factor 3 – (proporción, anidado); con 3 niveles (75:25, 50:50, 25:75; %); y 8 materiales (grupo control aislado) sin mezcla (los 3 MO + los 5 MM al 100%) para un total de 53 tratamientos (sustratos) y 159 unidades experimentales (UE) (tres réplicas por tratamiento). Cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel (Figura 5).

3.1.3 Variables estudiadas

3.1.3.1 Variables asociadas a la respuesta del sustrato

En fase soluble: CE (Conductividad Eléctrica) por el método conductimétrico – lectura a 25 °C; pH por el método potenciométrico; PO₄³⁻ (fosfatos) con el método de cloruro

estañoso y valoración colorimétrica; SO_4^{2-} (sulfatos) con el método de cloruro de bario y valoración colorimétrica; Cl^- (cloruros) con titulación con AgNO_3 ; y K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ con espectrofotometría de absorción atómica.

En fase intercambiable: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ intercambiables, por el método del Acetato de NH_4 1M pH 7, realizando la valoración por espectrofotometría de absorción atómica; la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) se determinó en el residuo del sustrato haciendo desplazamiento del NH_4^+ intercambiado con NaCl , con valoración volumétrica.

Micronutrientes disponibles (fase soluble e intercambiable): La extracción de Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} con DTPA y valoración por espectrofotometría de absorción atómica, se efectuó para evaluar además de las formas solubles e intercambiables de Fe^{2+} , aquellas presentes en complejos orgánicos e inorgánicos.

3.1.3.1 Variables asociadas a la respuesta de la planta

Porcentaje de prendimiento, retirando mecánicamente 10 esquejes de cada UE y determinando cuantos generaron raíces y se anclaron satisfactoriamente al sustrato. Cada esqueje anclado representaba el 10%. Al final se sumó el porcentaje de los esquejes anclados.

Peso fresco de raíz (Pf. Raíz), pesando las raíces inmediatamente después de extraídos los esquejes de los bancos de enraizamiento. Se debe tener en cuenta, que según los productores de este material vegetal, el principal indicador de un buen esqueje es su generación de raíces.

3.1.4 Análisis de datos

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

3.2 Resultados y Discusión

3.2.1 Mezclas de sustratos en su estado natural

Las mezclas de sustratos en su estado natural, es decir sin contacto con raíces de plantas, agua, y/o nutrientes fertilizantes presentan una CE dentro del rango óptimo, según los referentes presentados en la Tabla 3, no obstante, el pH de todas las mezclas cuyo componente orgánico es la cascarilla de arroz (CA) supera este rango (7), lo que podría generar una reacción alcalina en la solución del sustrato.

Tabla 21. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables en fase soluble e intercambiable evaluadas (n = 318).

		FASE SOLUBLE					FASE INTERCAMBIABLE					DISPONIBLES				
		K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄	CIC	Ca	K	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn
SOLUBLE	Pf. Raíz	-0,09	-0,10	0,36 *	0,26	0,28	-0,19	0,35 *	0,04	0,01	0,25	0,03	0,19	0,04	0,11	0,05
	CE	0,64 ***	0,54 **	0,49 *	0,54 **	0,10	0,44 *	0,31 *	-0,35	0,20	0,31 *	-0,35 *	0,17	0,11	0,48 *	0,34 *
	pH	0,36 *	0,14	0,15	0,32 *	-0,08	0,45 *	0,20	0,05	-0,41 *	0,20	-0,07	0,09	-0,20	0,45 *	0,29
	Ca	0,02	0,27	-0,11	-0,06	-0,05	0,17	-0,43 *	-0,13	-0,07	-0,18	-0,08	0,16	0,06	-0,04	0,13
	K	1,00	0,54 **	0,35 *	0,42 *	0,04	0,82 ***	0,15	-0,28	0,34 *	0,21	-0,30 *	0,05	0,00	0,59 **	0,43 *
	Mg		1,00	0,45 *	0,56 **	0,01	0,43 *	0,17	-0,23	0,07	0,53 **	-0,23	0,09	0,09	0,56 **	0,18
	Na			1,00	0,88 ***	0,45	0,06	0,76 ***	-0,22	0,11	0,72 ***	-0,19	-0,31 *	0,45 *	0,65 **	0,34 *
	Cl				1,00	0,34	0,13	0,72 ***	-0,23	0,14	0,75 ***	-0,22	0,26	0,32 *	0,69 **	0,31 *
	SO ₄					1,00	-0,15	0,32 *	-0,13	-0,06	0,21	-0,13	-0,33 *	0,43 *	0,18	0,30 *
	PO ₄						1,00	-0,10	-0,08	0,38 *	0,05	-0,13	-0,04	-0,16	0,47	0,37 *
INTERCAMBIABLE	CIC						1,00	0,00	0,23	0,73 ***	-0,01	0,12	0,37 *	0,52 **	0,24	
	Ca							1,00	0,16	-0,01	0,93 ***	-0,23	-0,20	-0,09	-0,27	
	K								1,00	0,09	0,18	-0,15	-0,13	0,30	0,22	
	Mg									1,00	-0,03	0,11	0,35 *	0,71 ***	0,07	
	Na										1,00	-0,24	-0,20	-0,13	-0,29	
DISPONIBLE	Cu											1,00	0,32 *	0,24	0,68 **	
	Fe												1,00	0,21	0,31 *	
	Mn													1,00	0,49 *	
	Zn														1,00	

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 " ".

La concentración de nutrientes en fase soluble mostró alta variabilidad, dependiendo de los constituyentes de la mezcla. Las mezclas cuyo componente mineral es la escoria de carbón (EC) presentan las concentraciones más altas de Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ y SO₄²⁻ solubles, mientras que aquellas con perlita (PE) contienen las mayores concentraciones de Na⁺, los sustratos con piedra pómez (PP) tienen las mayores concentraciones de Cl⁻ y los sustratos con CA las mayores concentraciones de PO₄³⁻ (Tabla 35).

En cuanto a la fase intercambiable, las mezclas cuyo componente mineral es la vermiculita (VE) presentaron la mayor CIC, así como aquellas cuyo componente orgánico es el sustrato de coco (SC). Las mezclas con zeolita (ZE) presentaron la mayor concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , pero no se aprecia una tendencia clara en cuanto a la concentración de K^+ .

Con respecto a los micronutrientes, las mezclas con EC presentaron la mayor concentración de Cu^{2+} , de igual forma, las mezclas con EC y VE presentaron la mayor concentración de Fe^{2+} , mientras que las mezclas con CA contienen la mayor concentración de Mn^{2+} y para el Zn^{2+} no se evidencia una tendencia clara (Tabla 35).

3.2.2 Respuesta de la planta

Cuando se estudia el comportamiento de los sustratos en contacto con agua y las raíces de las plantas se aprecia que entre la mayoría de las variables evaluadas las correlaciones son débiles (Tabla 21). El peso fresco de raíz (Pf.Raíz) no es explicado de manera satisfactoria por ninguna de las variables medidas en el sustrato (Tabla 21 y Figura 6). De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP), no se define un componente principal (CPn) que agrupe la mayor cantidad de variables, solo hasta el CP4 se obtuvo el 70% de la variabilidad de los datos (Tabla 22) y la única agrupación clara esta entre las variables Na^+ y Ca^{2+} en fase intercambiable.

Aunque la variable Pf.Raíz no se asocia claramente con una o un grupo de variables específicamente (Figura 6), de acuerdo con el análisis de varianza multivariado (Manova), se pudo evidenciar que existe un efecto multivariante sobre los sustratos evaluados, este efecto se presentó tanto para los factores, como para sus interacciones. (Tabla 23). Es así, como se procedió a determinar cuál de las variables presentaban diferencias significativas mediante pruebas univariantes (Anexo 1).

Tabla 22. Componentes (CP), escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 19 se alcanzó el 71% de la variabilidad de los datos.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Desviación estándar	2,4870	1,7574	1,6268	1,2497
Proporción de varianza	0,3255	0,1626	0,1393	0,0822
Proporción acumulada	0,3255	0,4881	0,6274	0,7096

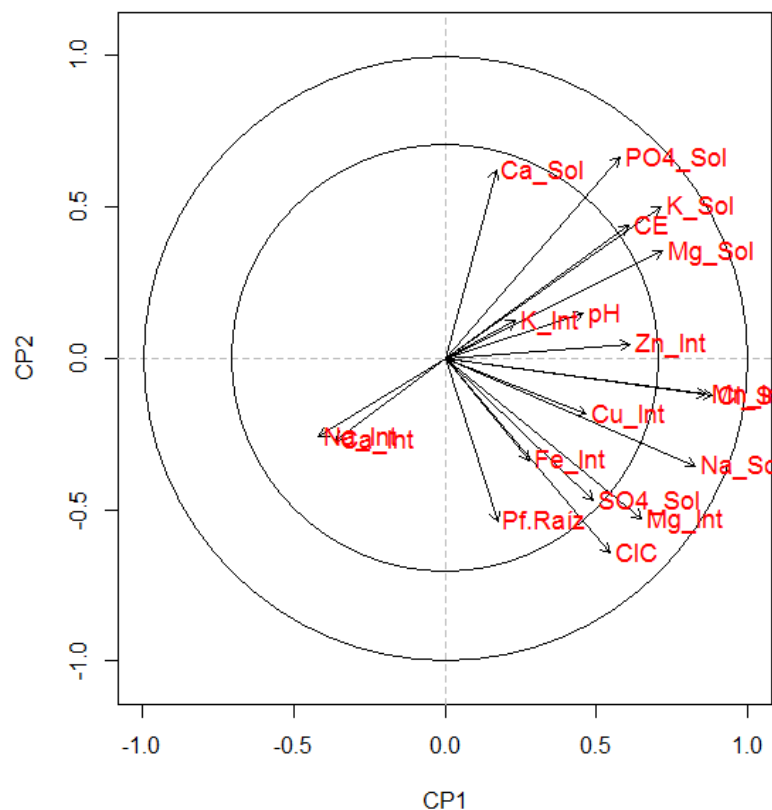


Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).

Tabla 23. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (*****) <math><0,0001</math>).

Factor	ddt	Df	Wilks	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)	
Orgánico	7	2	0,00022	249,764	38	144,0	2,20E-16	***
Mineral	7	4	0,00000	83,969	76	286,0	2,20E-16	***
Proporción	7	2	0,04901	13,329	38	144	2,20E-16	***
Org:Min	7	8	0,00000	42,533	152	547,96	2,20E-16	***
Org(Prop)	7	4	0,00332	12,259	76	286	2,20E-16	***
Min(Prop)	7	8	0,00005	10,306	152	547,96	2,20E-16	***
Org:Min:Prop	7	16	0,00000	7,672	304	930,36	2,20E-16	***
Residuales	7	90						
Orgánico	24	2	0,00024	239,393	38	144,0	2,20E-16	***
Mineral	24	4	0,00000	185,126	76	286,0	2,20E-16	***
Proporción	24	2	0,02000	23,004	38	144	2,20E-16	***
Org:Min	24	8	0,00000	36,944	152	547,96	2,20E-16	***
Org(Prop)	24	4	0,00346	12,101	76	286	2,20E-16	***
Min(Prop)	24	8	0,00005	10,023	152	547,96	2,20E-16	***
Org:Min:Prop	24	16	0,00001	4,714	304	930,36	2,20E-16	***
Residuales	24	90						

3.2.3 Conductividad eléctrica

La CE no mostró diferencias significativas para el factor “material de origen orgánico” (CA, CP y SC) a los siete días del ciclo de enraizamiento (Figura 7), pues estuvo dentro del rango óptimo (Tabla 3), similar a lo ocurrido en su estado natural (sin contacto con raíces, agua y/o soluciones nutritivas) (Tabla 35). A los 24 ddt la CE mantiene la tendencia mostrada a los 7 ddt (Figura 7), en donde los tres sustratos orgánicos tienen una CE dentro del rango óptimo (Tabla 3), no obstante, la CA presentó diferencias significativas, pues se incrementó su CE con respecto a la CP y al SC, aunque no en un nivel que suponga un efecto nocivo para el desarrollo de las plantas (Figura 7).

En cuanto al factor “material de origen mineral” (EC, PE, PP, VE y ZE), a los 7 ddt (Figura 7) todos los sustratos tienen una CE dentro del rango adecuado (Tabla 3). Cuando se comparan los resultados a los 7 ddt con los obtenidos a los 24 ddt (Figura 7), se puede evidenciar que la CE se mantiene dentro del rango óptimo (Tabla 3), aunque, a excepción de la VE y la ZE, todos tienden a incrementarse, pero no de forma significativa (Figura 7).

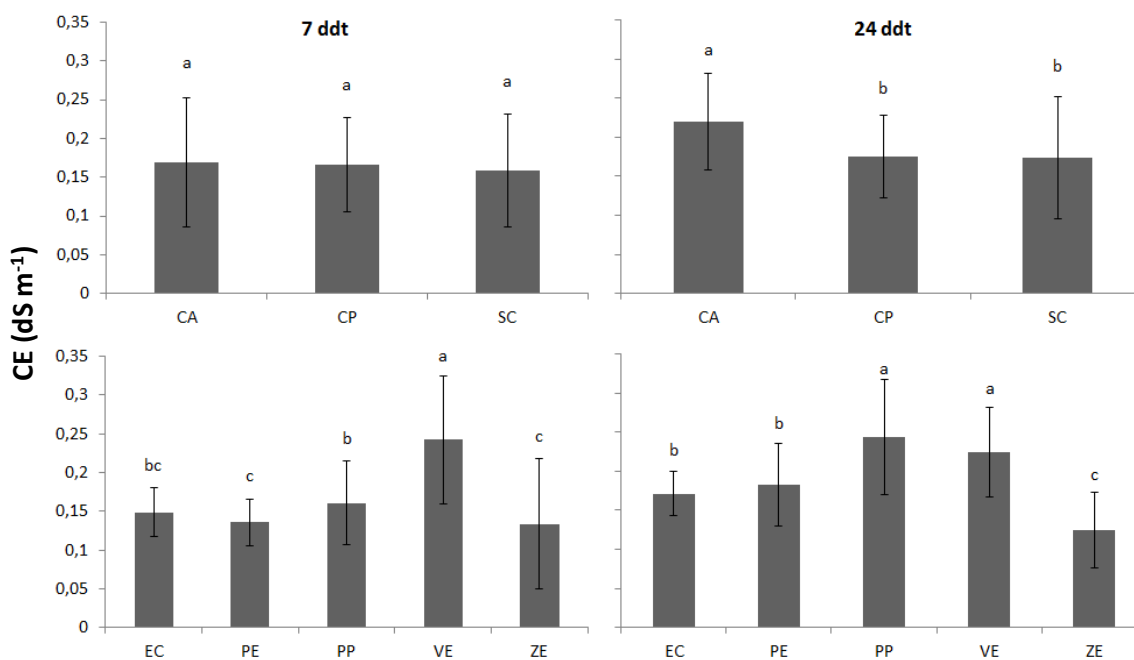


Figura 7. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$; $n=15$ ¹²).

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que estas tienen una CE dentro del rango adecuado (Tabla 3). A los 24 ddt la CE

¹² Cada barra muestra el promedio de 15 observaciones, debido a que cada sustrato de origen orgánico se mezcló con cinco materiales de origen mineral con tres repeticiones por mezcla.

de todas las mezclas se sigue manteniendo dentro de este rango (Tabla 3), no obstante, si se comparan estos resultados con lo mostrado por las mezclas al natural (Tabla 35), se evidencian cambios, pues en este estado, en promedio la CE se encontraba en $0,34 \text{ dS m}^{-1}$, mientras que a los 24 ddt fue de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, lo que indica una disminución en el contenido de sales como respuesta a procesos de lixiviación y de absorción por parte de las raíces de la planta. En cuanto a las mezclas sin tener en cuenta el factor "proporción", a los 24 ddt (Tabla 41) no se aprecian cambios substanciales con respecto a lo ocurrido a los 7 ddt (Tabla 40), pues los sustratos que tuvieron la mayor o menor CE se mantuvieron a lo largo del tiempo.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de CA genera un aumento en la CE, a medida que su contenido se incrementa dentro de la mezcla, tanto a los 7 (Figura 8-a) como a los 24 ddt (Figura 8-d), lo mismo ocurre con las mezclas que contienen SC (Figura 8-b, e). La CE de los sustratos que contienen CP no muestra una tendencia tan clara a aumentar (Figura 8-c, f), como aquellos mezclados con CA o SC, lo cual concuerda con la baja CE de la CP.

Las sales de cloruro y fosfato de potasio, magnesio y sodio, cuando se disocian, incrementan la CE, por lo que de acuerdo con los coeficientes de correlación de Pearson, se puede inferir que la CE de los sustratos evaluados está determinada principalmente por la concentración de los aniones Cl^- y PO_4^{3-} ($R^2 = 0,54$ y $0,44$, respectivamente (Tabla 21) y los cationes solubles K^+ , Mg^{2+} y Na^+ ($R^2 = 0,64$, $0,53$ y $0,49$, respectivamente (Tabla 21), que a su vez son los que se muestran en mayor concentración en la mayoría de los sustratos (Tabla 35). Se presentó una correlación negativa entre la CE y el Na^+ en fase intercambiable ($R^2 = -0,35$), que sugiere que cuando este catión está adsorbido en el complejo de cambio, se reduce su concentración en la fase soluble, por consiguiente disminuye la CE (Tabla 21).

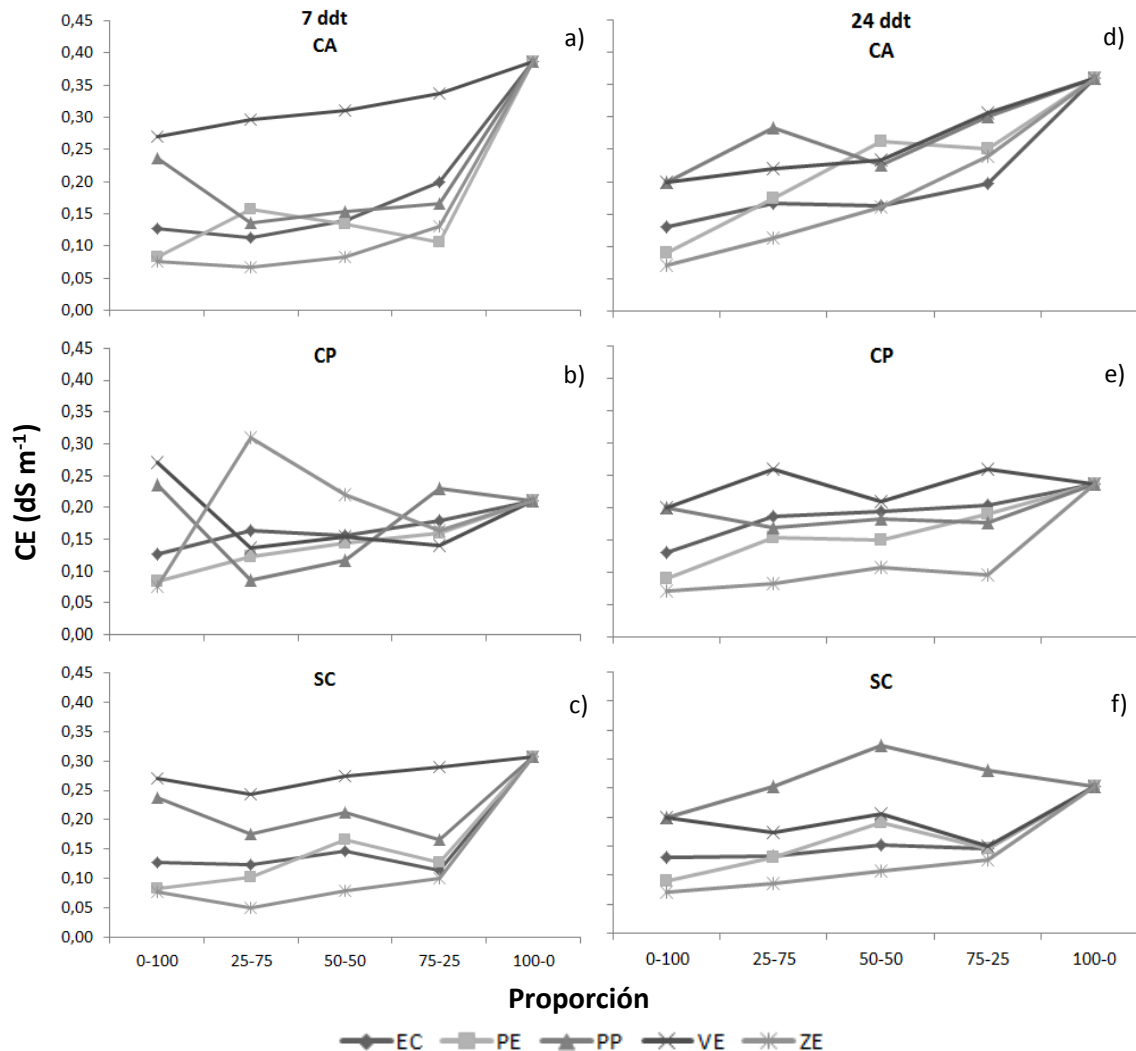


Figura 8. CE de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

3.2.4 pH

Para el factor “material de origen orgánico” el pH no mostró diferencias importantes entre los 7 y 24 ddt (Figura 9). No obstante, la CP es el único sustrato que tiene el pH dentro del rango adecuado (Tabla 3), aunque la CA y el SC, que superan este rango, no lo hacen de forma que suponga un efecto nocivo para la planta (Figura 9). En condiciones naturales, la CA tiene mayor tendencia a la alcalinidad que el SC (Tabla 35), lo cual se mantiene en condiciones de cultivo (Figura 9).

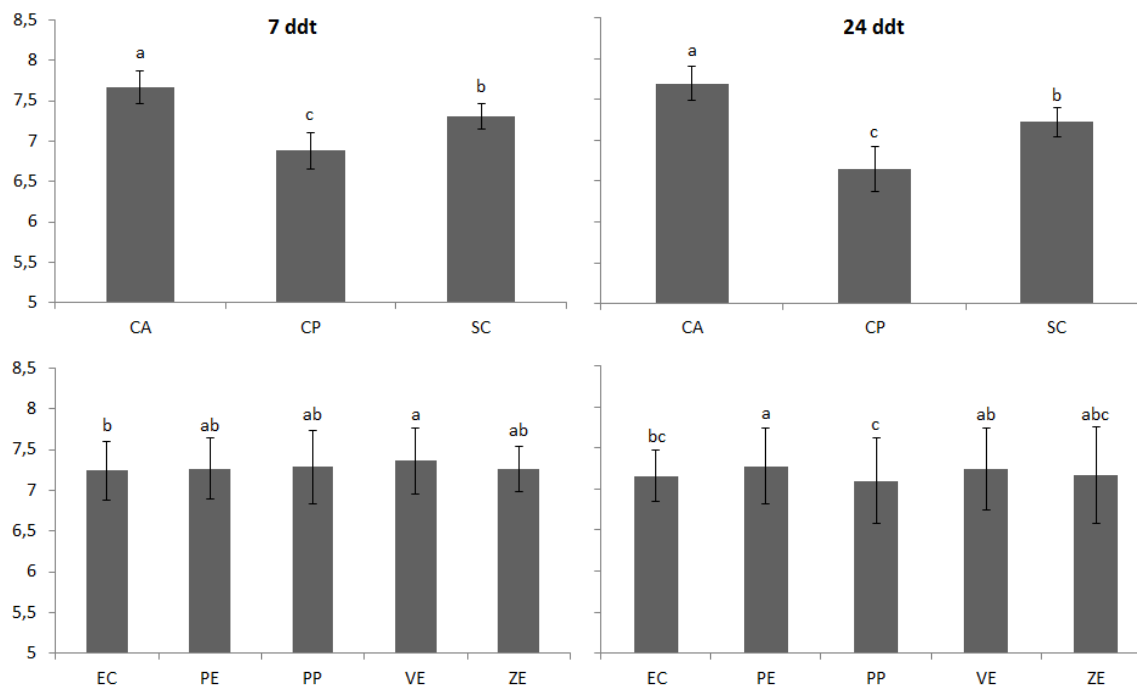


Figura 9. Comparación del pH de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los 7 ddt todas las mezclas tienen un pH que sobrepasa el rango adecuado (Tabla 3), aunque no en un nivel que pueda ser nocivo para el crecimiento de las plantas (Figura 9). A pesar de que el pH tiende a permanecer invariable a lo largo del tiempo, las diferencias entre los sustratos no se mantienen, pues a los 7 ddt la VE tuvo el mayor pH, mientras que la PE lo consiguió a los 24 ddt (Figura 9).

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que el pH de las mezclas que contienen CA y SC superan el rango de pH adecuado a los 7 ddt, destacándose la CA100 (8,2), y la CA75-VE25 (8,0) (Tabla 38). Estos sustratos se encontraban dentro de los que menos ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz) generaron (Tabla 54), y además, la CA100 pertenecía al grupo de los sustratos con menor concentración de N y microelementos, lo que sugiere que este pH alcalino está limitando la absorción de estos nutrientes (Neumann y Römheld, 2012).

A los 24 ddt el pH de los sustratos que contienen CA y SC siguen superando el rango óptimo, destacándose igualmente la CA100 (8,03), aunque el pH de la CA75-VE25 se redujo de 8 a los 7 ddt a 7,77 a los 24 ddt. Los cambios no fueron substanciales, probablemente porque la ventana de observación es muy corta: 7 días (de 0 a 7) y luego 17 días (de 7 a 24), no obstante, si se comparan estos resultados con lo mostrado por las mezclas al natural (Tabla 35), se evidencia un mayor cambio, pues en este estado, en promedio el pH se encontraba en 7,7; mientras que a los 24 ddt fue de 7,21, lo que indica una disminución del pH, que obedece al proceso de intercambio de iones entre las raíces de las plantas y la solución del sustrato, reacción que genera acidez (Neumann y

Römheld, 2012). En cuanto a las mezclas sin tener en cuenta el factor “proporción”, a los 24 ddt (Tabla 41) no se aprecian cambios substanciales con respecto a lo ocurrido a los 7 ddt (Tabla 40), pues los sustratos que tuvieron el mayor o menor pH se mantuvieron a lo largo del tiempo.

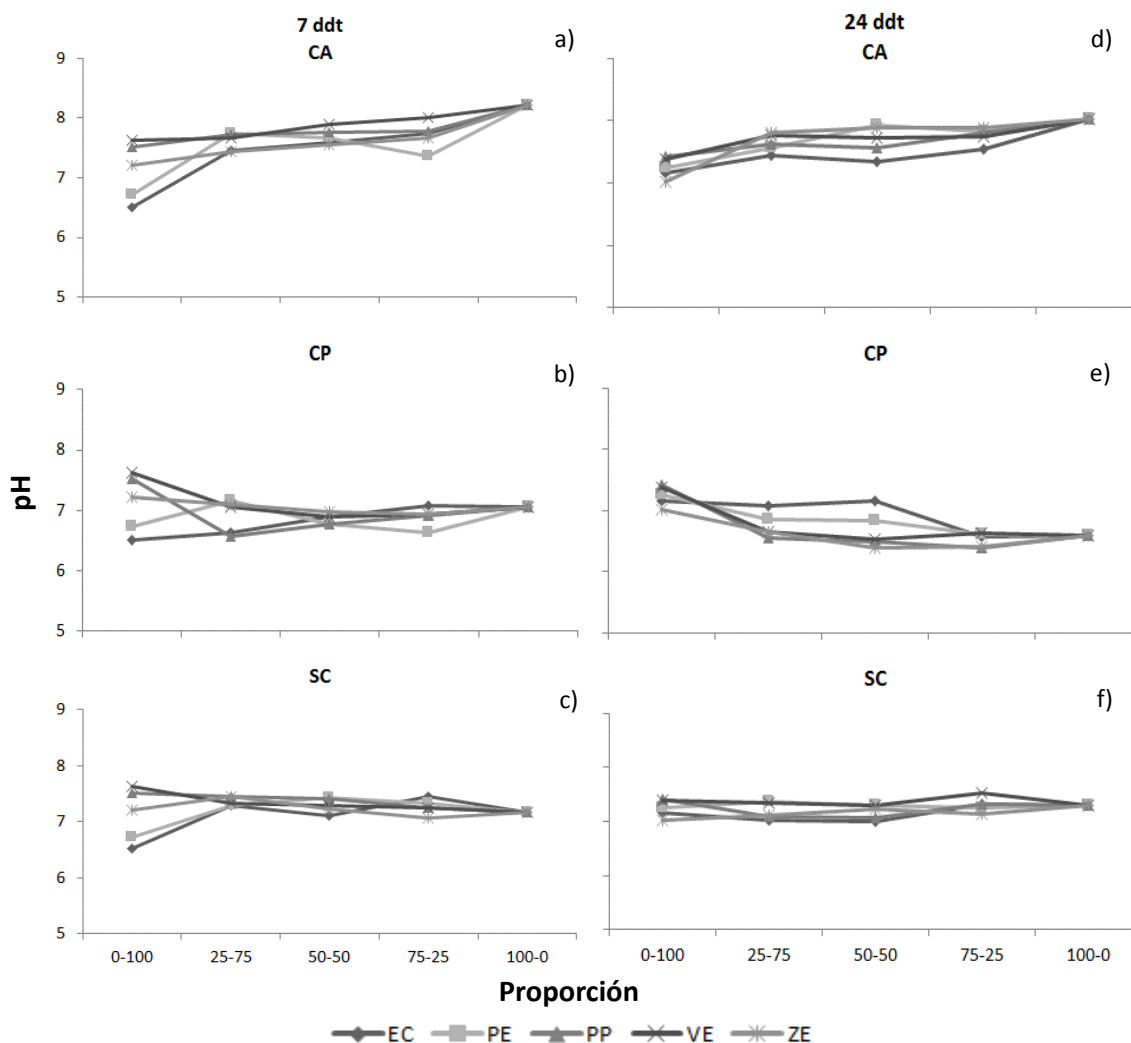


Figura 10. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su constituyente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de CA genera un leve aumento en el pH, a medida que su contenido se incrementa dentro de la mezcla, tanto a los 7 (Figura 10-a) como a los 24 ddt (Figura 10-d). El pH de los sustratos que contienen CP (Figura 10-b y e), no muestra una tendencia tan clara a aumentar, como aquellos mezclados con CA (Figura 10-a y d), lo cual concuerda con el pH neutro de la CP. El pH de los sustratos que contienen SC permanece casi inalterado con las diferentes proporciones (Figura 10-c y f).

3.2.5 Concentración de iones en fase soluble

Analizando la concentración de iones en la fase soluble de los materiales de origen orgánico, se aprecia que la CA contiene la mayor concentración de PO_4^{3-} tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 12), lo cual genera que a medida que el contenido de CA disminuye, lo mismo ocurre con la concentración de PO_4^{3-} en la mezcla (Figura 13 y Figura 14). La más alta concentración de Na^+ soluble se presenta en las mezclas con SC (Figura 11). Esta concentración se incrementa notablemente cuando los sustratos entran en contacto con agua y raíces, pues en estado natural su concentración es de $112,3 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que a los 7 ddt es de $204,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 11) y a los 24 ddt es de $215,57 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 11). Teniendo en cuenta que el agua de riego no presentaba una concentración importante de Na^+ (Tabla 24), se podría atribuir este incremento a los altos contenidos de Na total del SC (Tabla 6), que al entrar en contacto con agua comenzó un proceso de disolución.

En general, a excepción del K^+ para la CP y el SC, todos los cationes solubles aumentaron de los 7 a los 24 ddt (Figura 11), lo cual es más notorio en la CA y la CP que en el SC. Esto se debe a la mayor CIC del SC, que le permite disponer de un mayor número de sitios de adsorción de cationes en el complejo de cambio, disminuyendo de esta forma su desorción a la fase soluble. Los aniones en fase soluble no muestran una tendencia tan clara como los cationes en esta misma fase (Figura 12), lo cual se debe a que estos aniones no están influenciados de una forma tan notoria por el efecto de las cargas superficiales como los cationes.

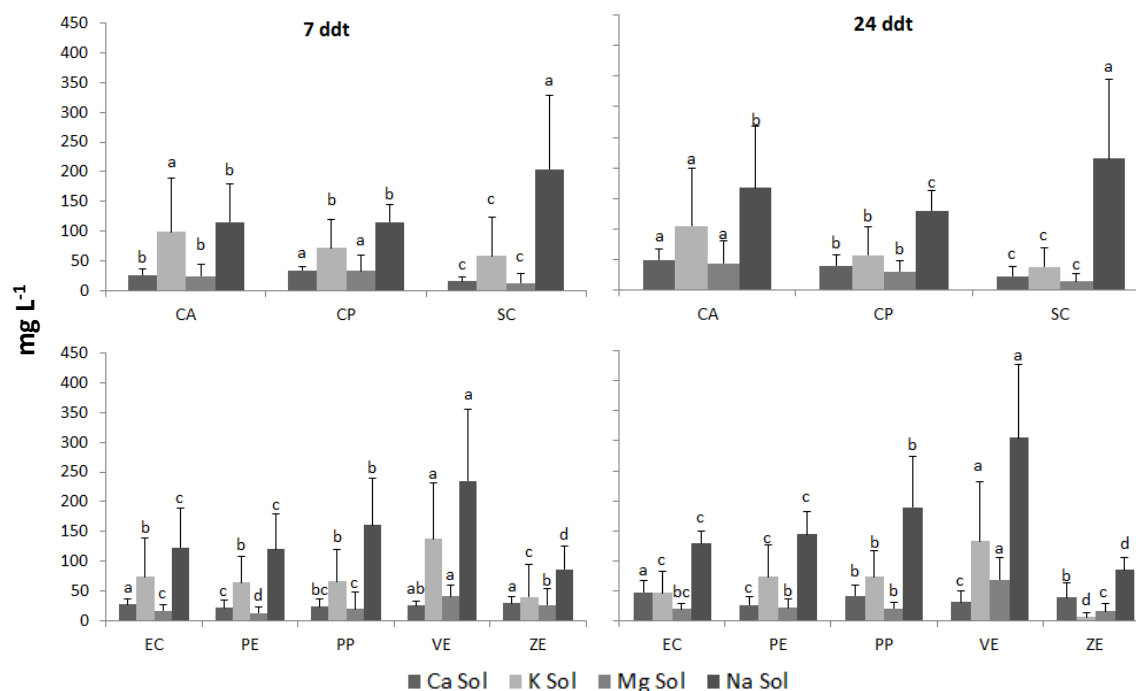


Figura 11. Comparación de la concentración de cationes en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, se aprecia que la concentración de Na^+ en solución es alta con respecto al Ca^{2+} , el K^+ y el Mg^{2+} , sobre todo para la VE (Figura 11). Esto sugiere obstáculos de tipo antagónico en el proceso de absorción de nutrientes por parte de las raíces. Esta tendencia se mantiene para la concentración de aniones en fase soluble, donde la VE contiene la mayor concentración de Cl^- y PO_4^{3-} y la segunda mayor concentración de SO_4^{2-} (Figura 12). Para todos los materiales de origen mineral, el Ca^{2+} soluble aumentó de los 7 a los 24 ddt, lo contrario ocurrió para la concentración de Mg^{2+} y Na^+ solubles (Figura 11). El Cl^- y SO_4^{2-} de la VE incrementaron su concentración de los 7 a los 24 ddt, a diferencia de la ZE y de la PP (Figura 12).

Tabla 24. Propiedades y composición química del agua de riego utilizada en la investigación.

Agua riego	CE ds m^{-1}	pH	Ca	K	Mg	Na	NO_3	SO_4	PO_4	Cl
			mg L^{-1}							
	0,4	7,0	13,6	2,5	3,4	6,0	0,04	2,2	0,1	94,0

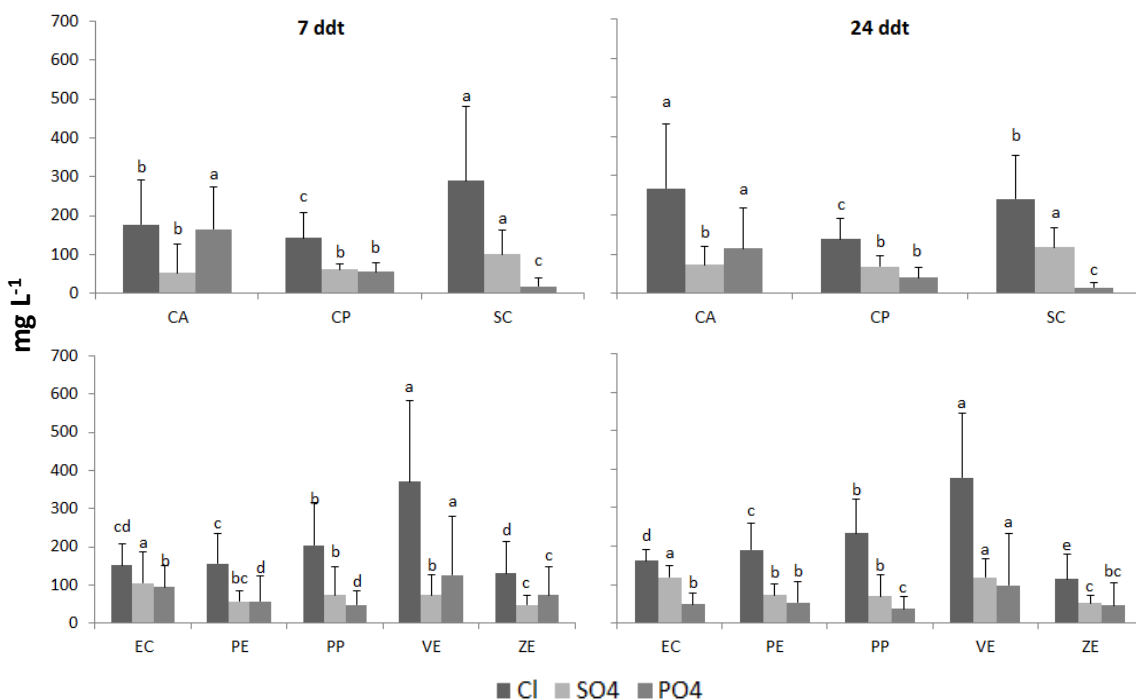


Figura 12. Comparación de la concentración de aniones en la fase soluble de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de trasplante. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Al comparar todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas (Anexo 1), de los 7 a los 24 ddt se pueden apreciar cambios variables, ya que unos sustratos disminuyeron su concentración ($\text{EC} = 67,1 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$ soluble a los 7 ddt y $57,43 \text{ mg L}^{-1}$ a los 24 ddt), mientras que otros la aumentaron ($\text{CA75-ZE25} = 49,6 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$ soluble a los 7 ddt y $95,9 \text{ mg L}^{-1}$ a los 24 ddt) (Tabla 40), esto refleja procesos de adsorción o desorción más marcados para unos sustratos que para otros. Es así, como por ejemplo la EC100 tiene la mayor concentración de Ca^{2+} soluble, mientras que la CA100 tiene la mayor concentración de K^+ y PO_4^{3-} , el CP75-PP25 la de Mg^{2+} , SC75-VE-25 la de Na^+ y Cl^- y CA50-EC50 la de SO_4^{2-} (Tabla 38). Cuando se comparan las mezclas sin tener en

cuenta la proporción (Tabla 39) los sustratos VE100, CA-VE y CP-ZE contienen la mayor concentración de Mg^{2+} soluble y el SC100 la mayor concentración de SO_4^{2-} .

En promedio, el Na^+ soluble presentó una concentración más alta ($154,5 \text{ mg L}^{-1}$), comparada con los cationes Ca^{2+} ($31,8 \text{ mg L}^{-1}$), K^+ (75 mg L^{-1}) y Mg^{2+} ($26,5 \text{ mg L}^{-1}$), y debido a que estas son formas disponibles para la absorción por parte de las raíces, el Na^+ podría estar presentando un fuerte antagonismo con el Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} por su entrada a la planta, y por eso este catión muestra relación con el peso fresco de raíz. El Na^+ es considerado un nutriente benéfico, que puede reemplazar en cierto grado las funciones del K^+ , por ejemplo, como osmoregulador (Broadley *et al.*, 2012).

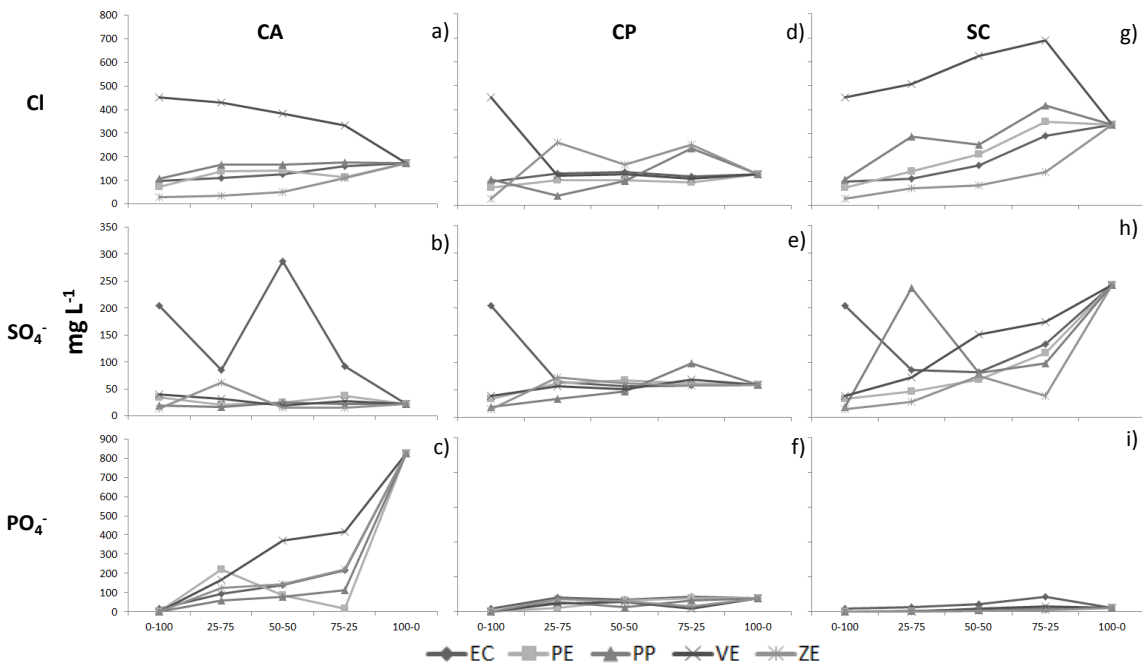


Figura 13. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

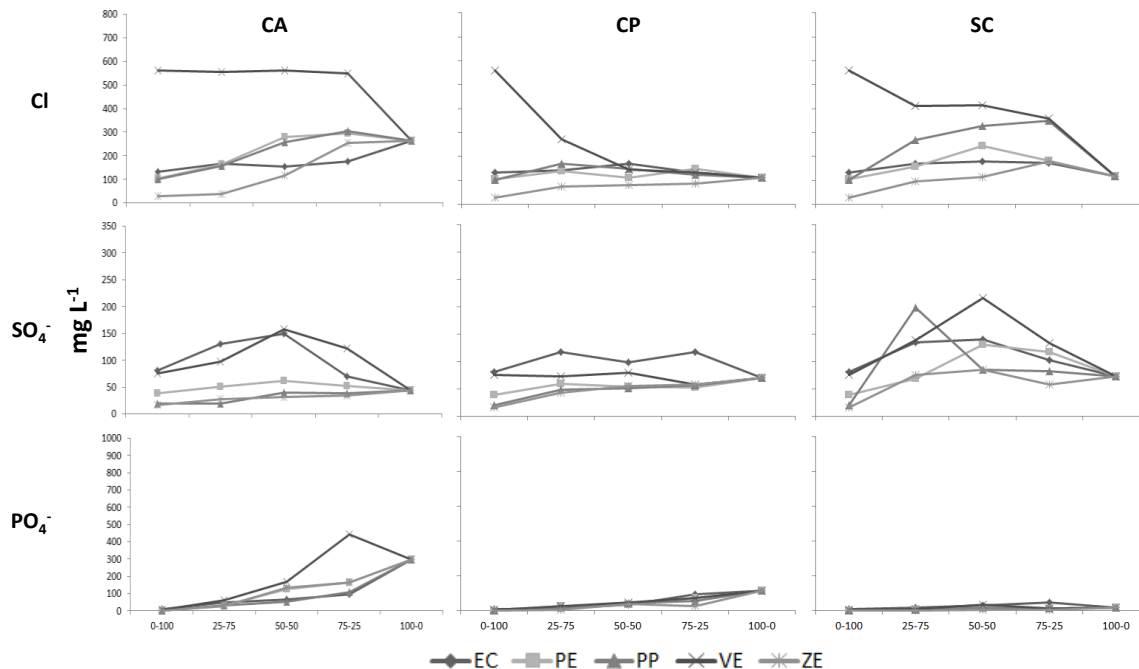


Figura 14. Concentración de aniones en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su constituyente orgánico, a medida que se incrementa el contenido de CA, aumenta la concentración de K^+ soluble, tanto a los 7 (Figura 15) como a los 24 ddt (Figura 16). A medida que disminuye el contenido de VE también disminuye la concentración de Mg^{2+} y Na^+ solubles (Figura 15 y Figura 16), la concentración de Cl^- disminuye a medida que la VE se combina con dosis crecientes de CA, CP y SC (Figura 13 y Figura 14). Cabe resaltar, que la concentración de Cl^- disminuye drásticamente con el 25% de CP en la mezcla CP_VE (Figura 13), en contraste con la disminución paulatina que se aprecia con las mezclas CA_VE (Figura 13) y SC_VE (Figura 13). Los sustratos con CP no muestran una tendencia clara para ningún ión (Figura 13 y Figura 14).

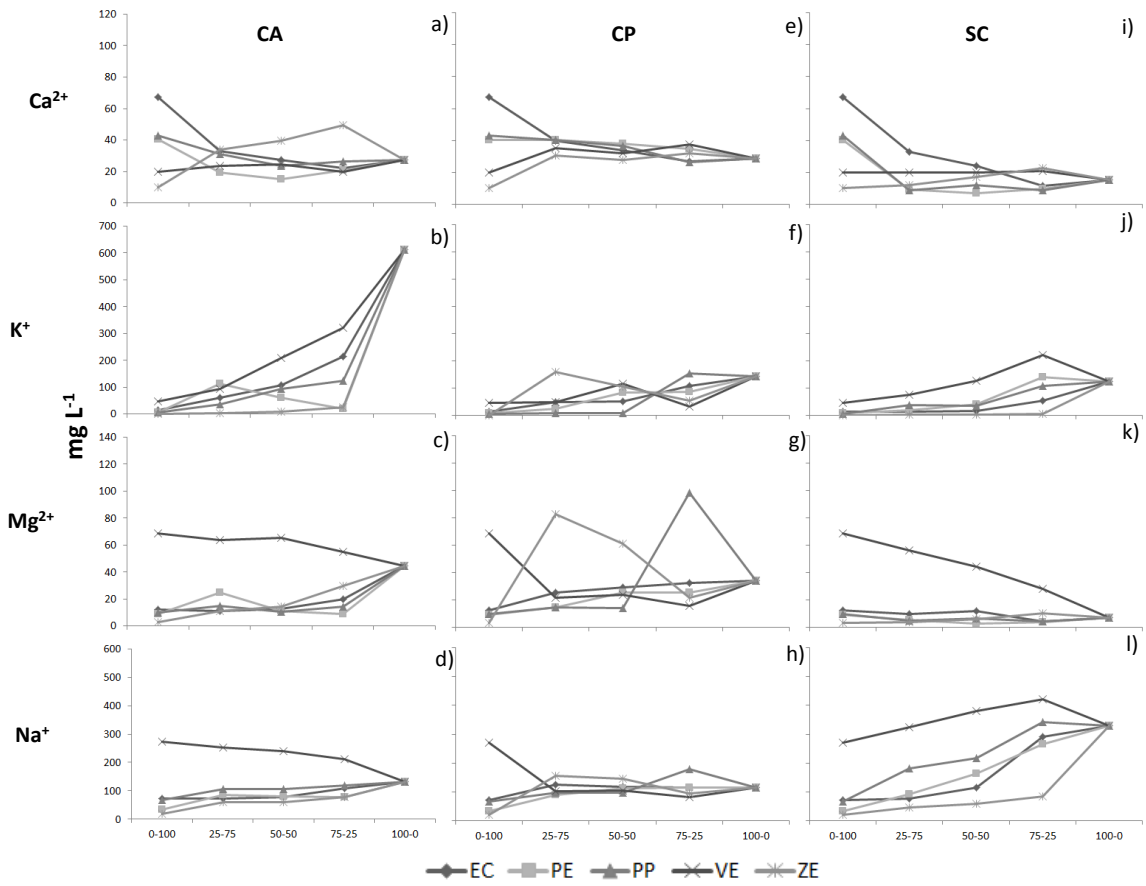


Figura 15. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

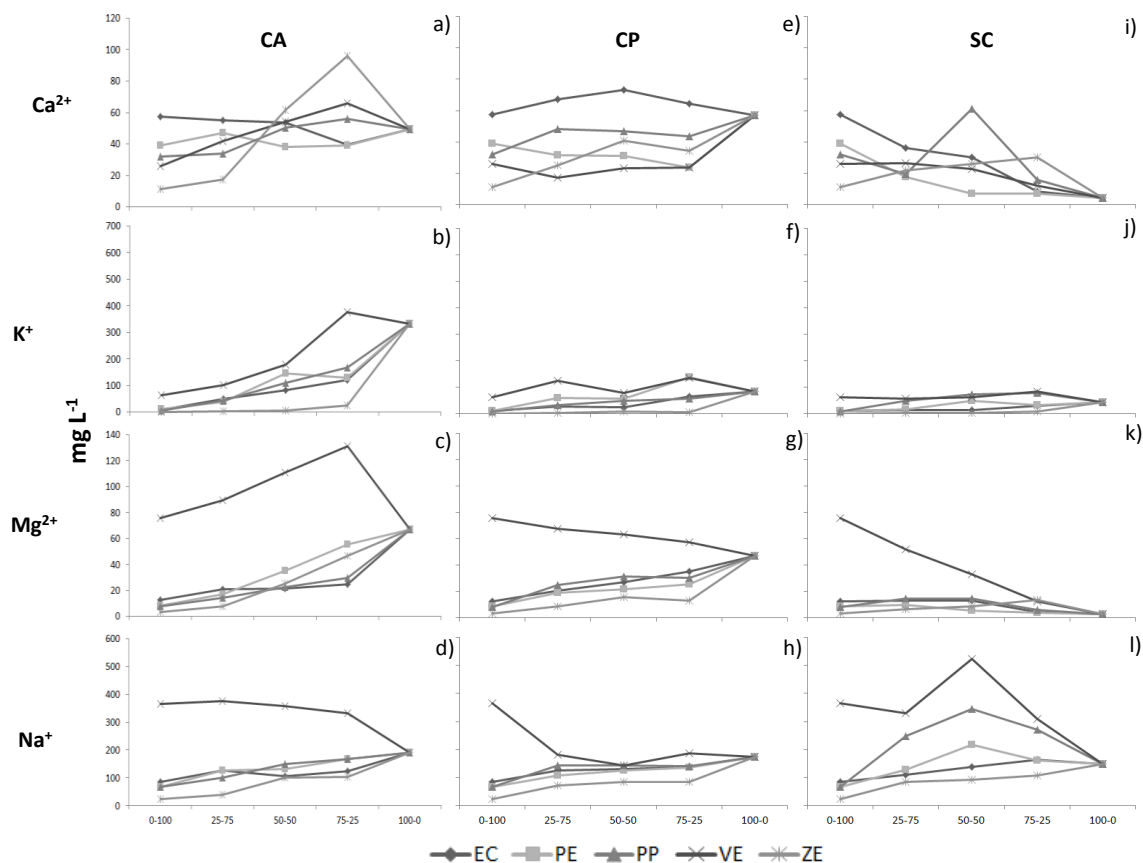


Figura 16. Concentración de cationes en la fase soluble de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.2.6 Propiedades de intercambio

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt el SC presentó la mayor CIC (Figura 17), tal como se observó con el material de partida (Tabla 36). La CIC de este sustrato es 100% mayor con respecto al siguiente material, la CA. Esto se corresponde con la mayor concentración de cationes intercambiables (a excepción del K^+) (Figura 17) del SC (Tabla 55). Por otro lado, los cationes en fase intercambiable permanecieron casi invariables, pues las diferencias que se presentaron a los 7 ddt, se mantuvieron a los 24 ddt (Figura 17). Cabe recordar que las mezclas con SC generaron la mayor ganancia de peso fresco de raíces (Pf.Raíz).

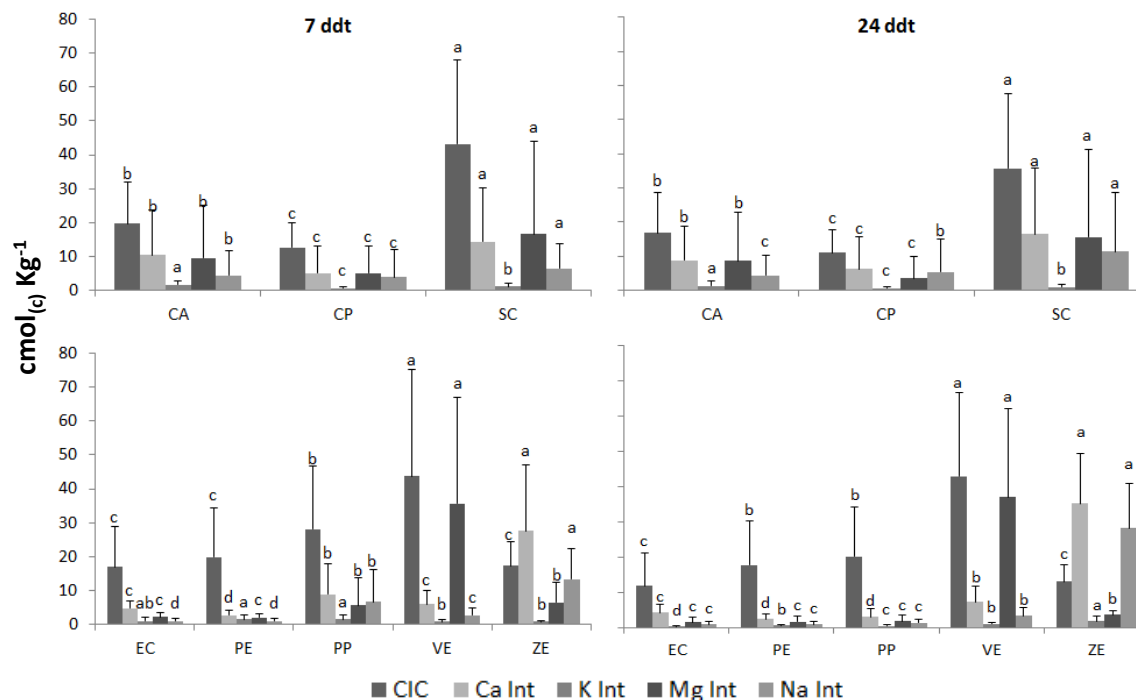


Figura 17. Propiedades de intercambio de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt, la VE mostró la mayor CIC (Figura 17), que concuerda con lo evidenciado en estado natural (Tabla 36) con el complejo de cambio dominado por Mg^{2+} . La mayor concentración de Ca^{2+} y Na^+ la tiene la ZE y la de K^+ la PE y la PP (Figura 17). Es de esperarse que la alta CIC de la VE influya substancialmente sobre su concentración de cationes en estado intercambiable. La CIC, al igual que la concentración de la mayoría de los cationes en fase intercambiable permanecieron casi invariables de los 7 (Figura 17) a los 24 ddt (Figura 17). No obstante, se presentó un claro aumento de K^+ en fase intercambiable en la ZE de los 7 a los 24 ddt, paralelo a la disminución de su concentración en fase soluble, lo cual puede sugerir un incremento en el proceso de adsorción de este catión a las superficies cargadas negativamente de la ZE.

El sustrato que generó el mayor Pf.Raíz es el SC50-VE50 (Tabla 54), que concuerda con los resultados de CIC. De igual forma, sin tener en cuenta el factor “proporción” se presenta la misma tendencia mostrada con los sustratos con la combinación de los tres factores (material orgánico – material mineral - proporción), en donde los materiales que contienen SC y VE mostraron la mayor CIC (Tabla 43), que sigue concordando con los resultados de Pf.Raíz (Tabla 55). A los 24 ddt no existe variación en la tendencia que muestra que las mezclas que contienen SC y VE son los que poseen mayor CIC (Figura 18), aunque en general se aprecia una disminución de la CIC de los 7 a los 24 ddt (Tabla 44), lo mismo ocurre cuando se comparan los sustratos sin tener en cuenta la proporción en la mezcla (Tabla 45).

A medida que aumenta el contenido de SC en la mezcla se incrementa la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Esta situación se incrementa cuando se incluye VE en la mezcla, pues la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables aumenta notablemente, tanto para SC_VE, como para CA_VE (Figura 19 y Figura 20). Esta tendencia no es tan clara para la mezcla CP_VE (Figura 19 y Figura 20). La concentración de K^+ intercambiable es más alta en el SC y la CA, por ende, los sustratos que contienen estos dos materiales orgánicos muestran mayor concentración de K^+ a medida que aumenta el contenido del material en la mezcla (Figura 19 y Figura 20).

En cuanto a la concentración de Na^+ intercambiable, se aprecia que la ZE genera un aumento de este catión a medida que el contenido de ZE se incrementa en la mezcla, esto es más evidente para las mezclas CA_ZE y SC_ZE, que para CP_ZE (Figura 19 y Figura 20). Esto concuerda con la alta concentración de Na^+ que tiene la ZE (Tabla 42 y Tabla 44).

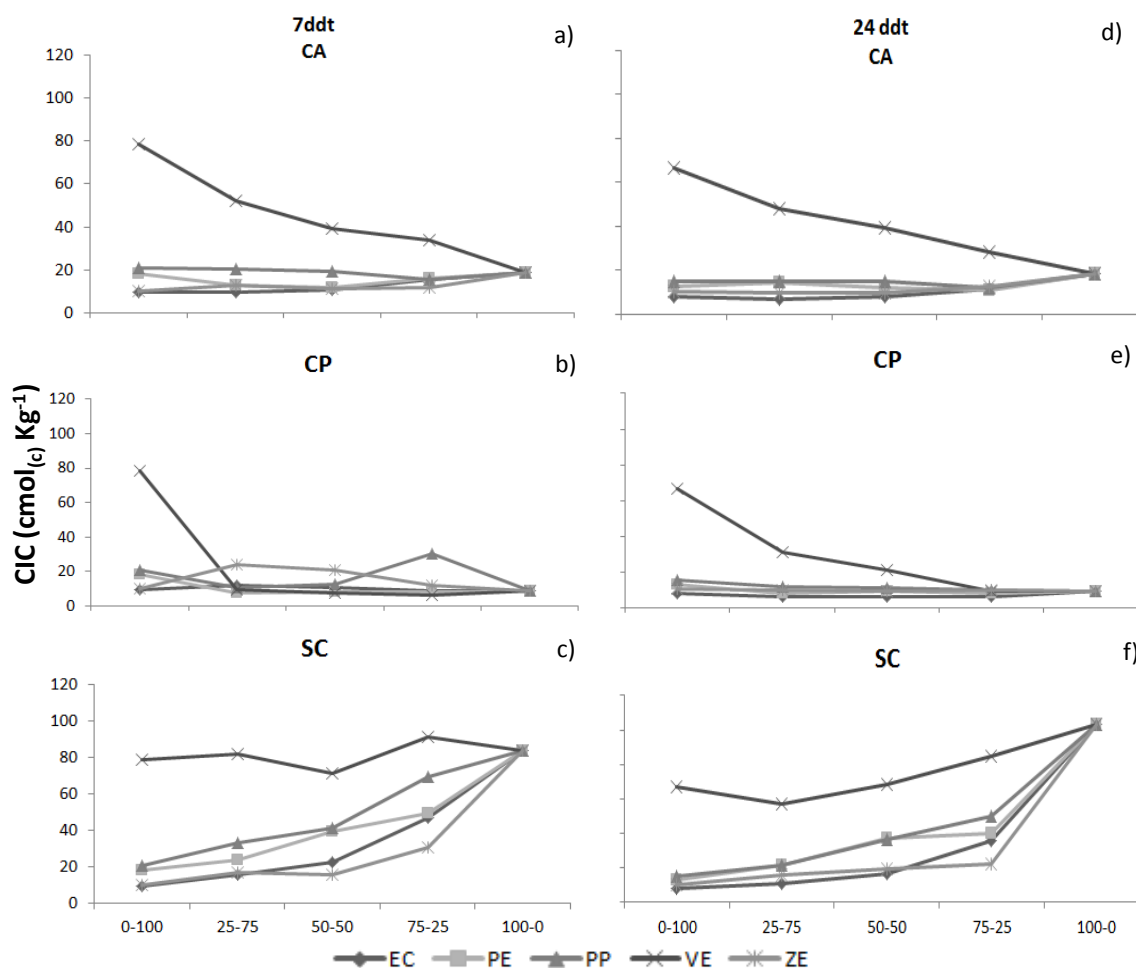


Figura 18. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; $n=3$.

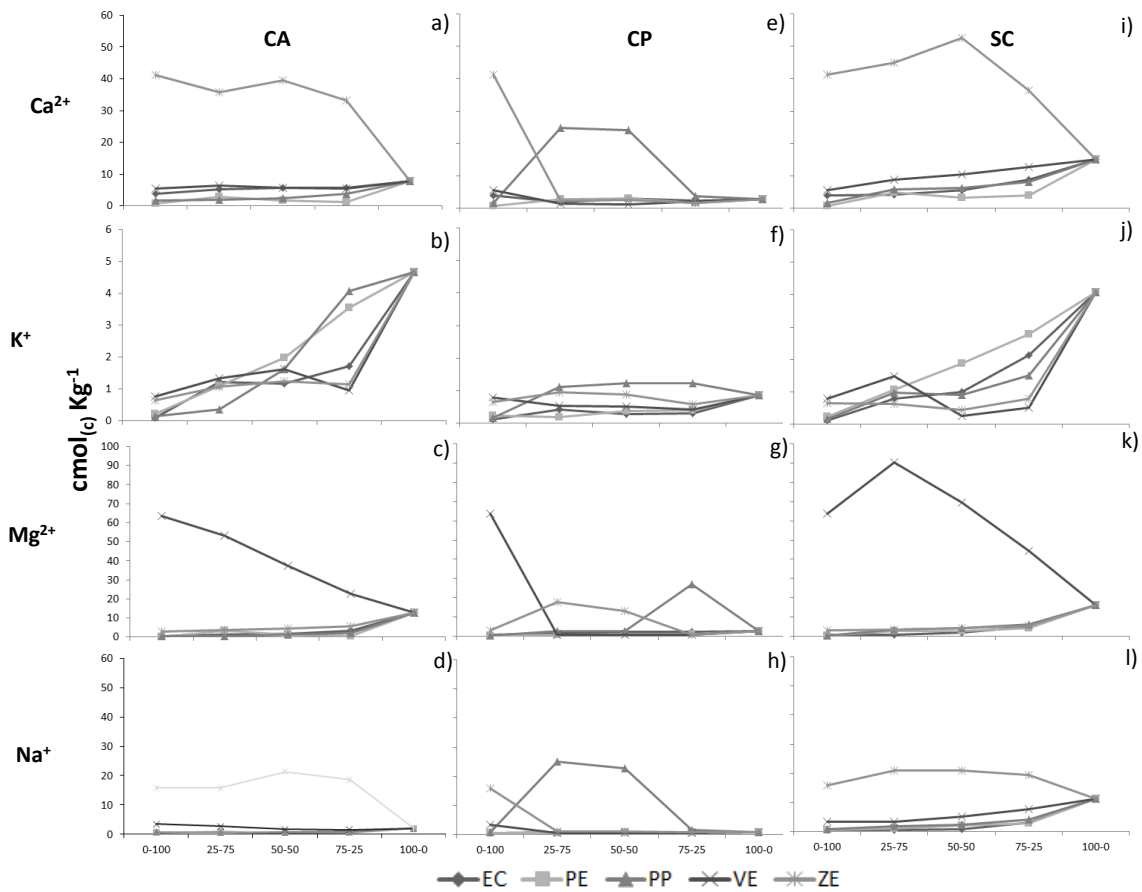


Figura 19. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

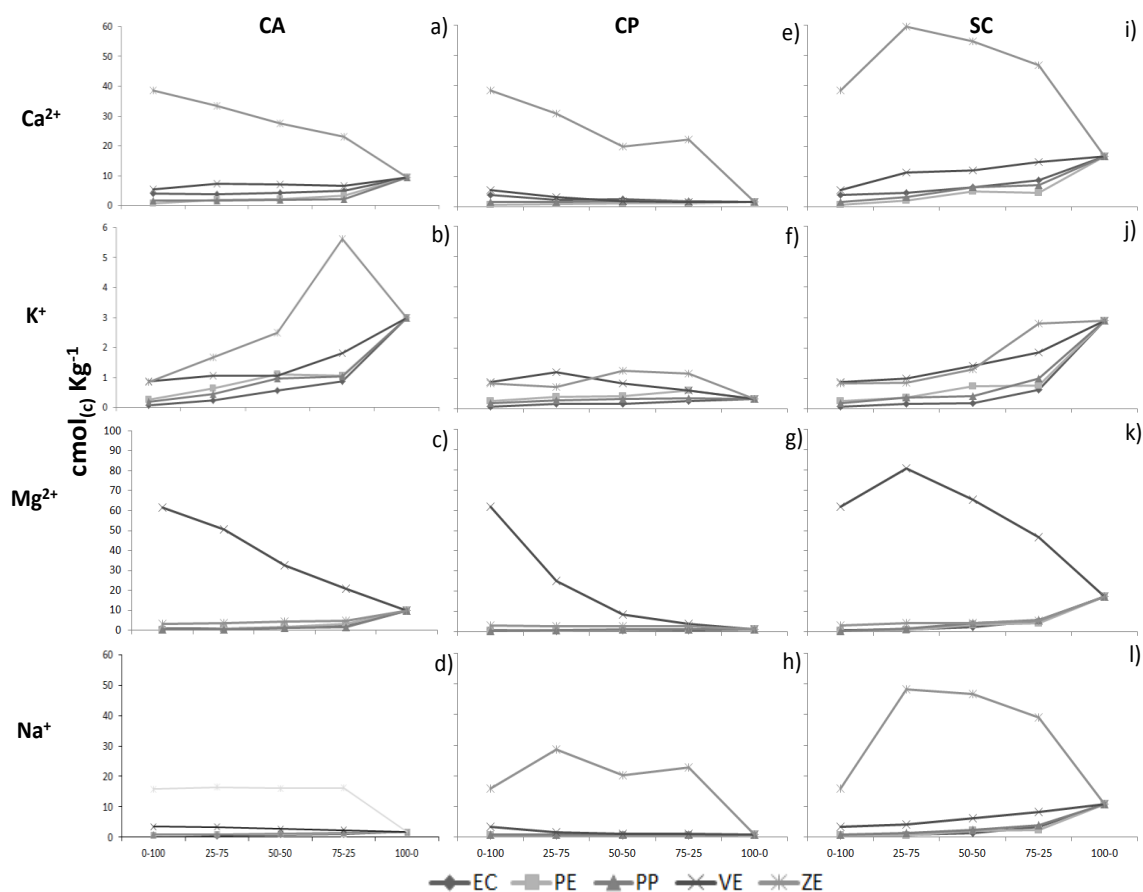


Figura 20. Propiedades de intercambio de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.2.7 Concentración de micronutrientes

Para el factor "material de origen orgánico", el SC contiene la mayor concentración de Fe^{2+} y Cu^{2+} , mientras que la CA tiene la mayor concentración de Mn^{2+} y Zn^{2+} (Figura 21), no obstante, a los 24 ddt (Figura 21), a excepción del Fe^{2+} del SC y el Mn^{2+} y Zn^{2+} de la CP, la concentración de todos los micronutrientes aumentó de los 7 a los 24 ddt para los tres sustratos (Figura 21).

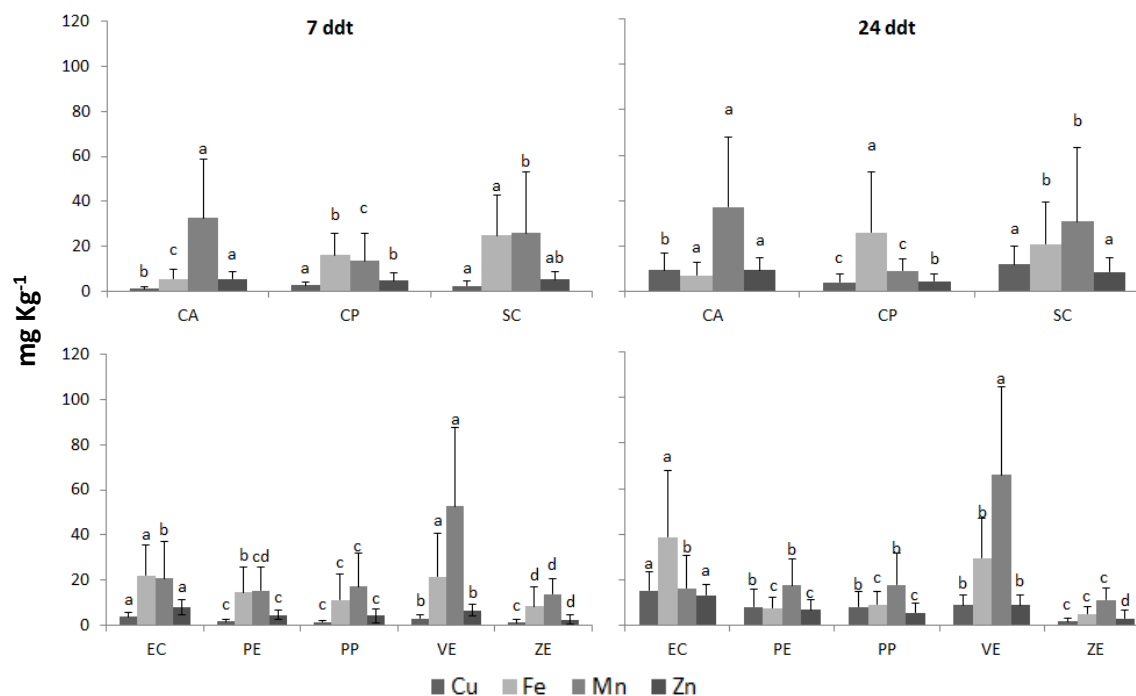


Figura 21. Concentración de micronutrientes de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Debido a que la CA contiene la mayor concentración de Mn^{2+} y Zn^{2+} (Tabla 42 y Tabla 44), es evidente que las mezclas que contienen CA presentaran mayores concentraciones de estos micronutrientes a medida que el contenido de CA aumentó en la mezcla (Figura 22 y Figura 23).

Al igual que con los cationes y aniones en fase intercambiable y soluble, la CP no muestra una tendencia clara para los micronutrientes, ya que no se evidencia que su mayor o menor contenido en el sustrato, genere claramente un aumento o disminución de la concentración de iones (Figura 22 y Figura 23). Esta situación se debe a la baja CIC que tiene este sustrato (8,6 y 9,17 $cm_{(c)} Kg^{-1}$ a los 7 y 24 ddt, respectivamente), comparado con los otros dos materiales de origen orgánico (Tabla 42 y Tabla 44).

Para el factor “material de origen mineral”, los cinco sustratos incrementaron su concentración de Cu^{2+} y Zn^{2+} de los 7 a los 24 ddt (Figura 21), no obstante, el Fe^{2+} y el Mn^{2+} no presentaron una tendencia clara, aunque las diferencias estadísticas se mantuvieron de los 7 a los 24 ddt entre los sustratos, donde la EC contiene la mayor concentración de Cu^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , mientras que la VE tiene la mayor concentración de Mn^{2+} (Figura 21).

Los materiales que tienen la mayor concentración de Fe^{2+} son: SC, VE y EC (Tabla 42 y Tabla 44), lo cual explica la razón por la cual las mezclas SC_VE y SC_EC en sus diferentes proporciones, contienen la mayor concentración de este micronutriente (Figura 22 y Figura 23). De igual forma, a medida que aumenta el contenido de SC en las

mezclas, la concentración de Zn^{2+} también aumenta (Figura 22 y Figura 23). Lo mismo ocurre con las mezclas que contienen CA (Figura 22 y Figura 23).

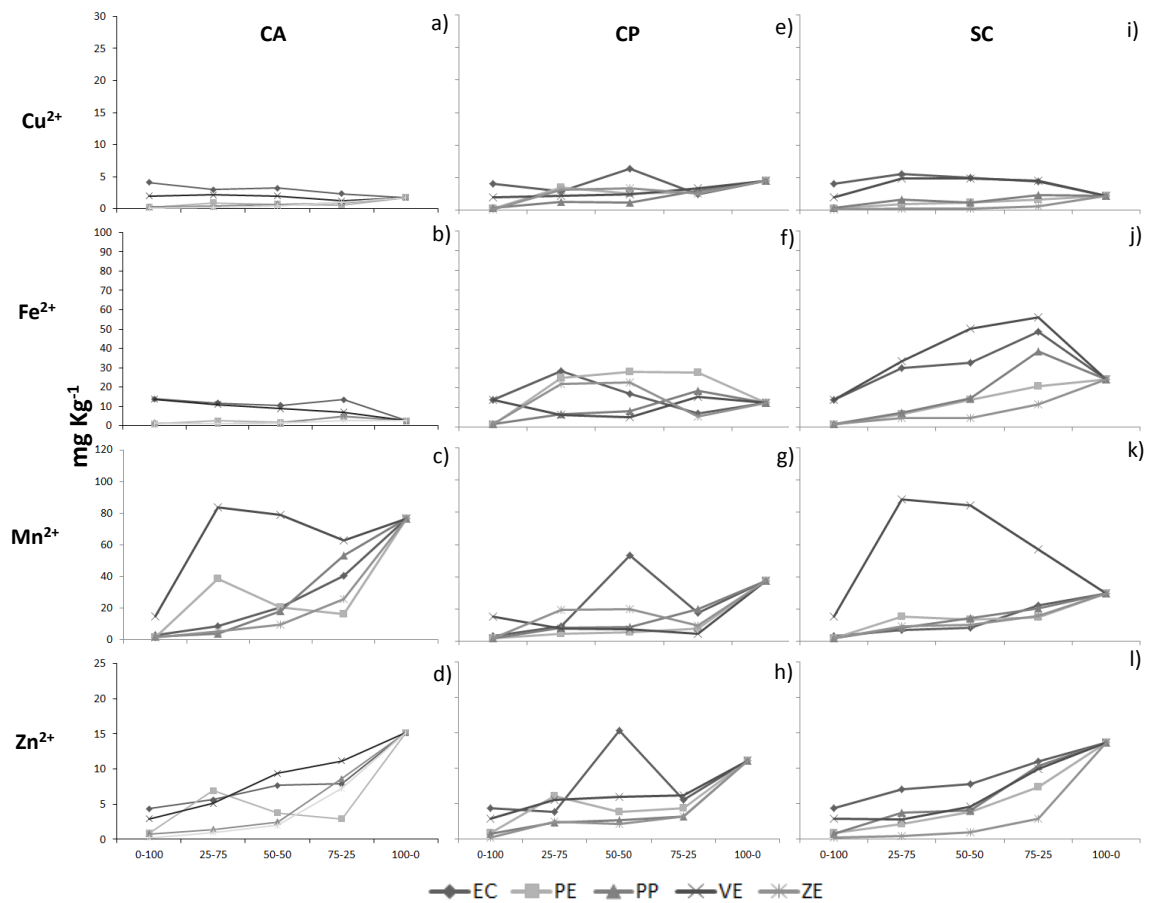


Figura 22. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

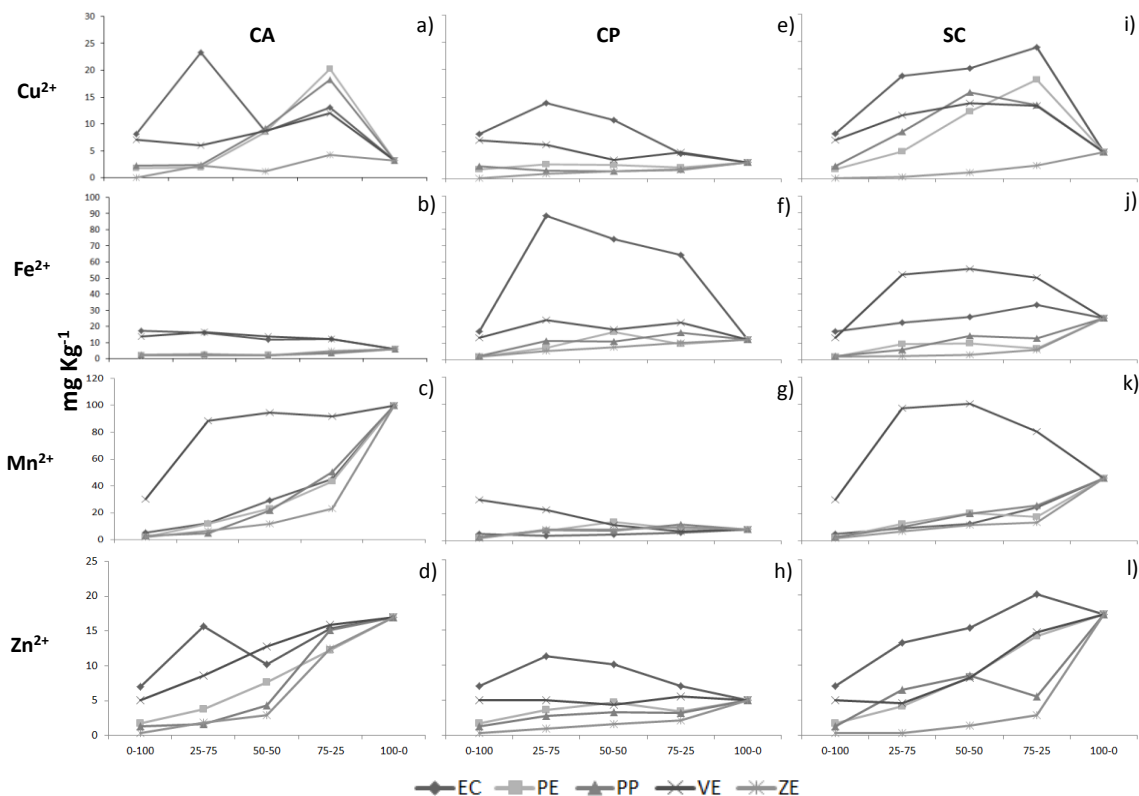


Figura 23. Concentración de micronutrientes de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

3.3 Conclusiones

El sustrato de coco y la vermiculita presentaron una mayor capacidad de intercambio catiónico, tanto en estado natural (crudo) como en fase de propagación, lo cual concuerda con la mayor ganancia de peso fresco de raíces para las plantas que se propagaron en estos sustratos, aunque estas variables no mostraron correlación positiva significativa.

La concentración de sales y el pH de las mezclas disminuyeron al entrar en contacto con el agua y las raíces de los esquejes de clavel, no obstante, de los 7 a los 24 ddt no se aprecian cambios notables entre los sustratos evaluados, aunque si hay una tendencia a la disminución de la concentración de iones en fase soluble e intercambiable, que obedece a procesos de absorción desde la fase soluble a las raíces de las plantas y desorción desde las superficies cargadas, a la solución del sustrato.

Independiente de la composición total de elementos de los materiales de origen mineral caracterizados, unos tienen mayor tendencia a solubilizar iones, que pueden ser posteriormente absorbidos por las plantas. Este es el caso de la escoria de carbón, cuya

cantidad total de calcio, potasio y magnesio no es la mayor comparada con los otros materiales, sin embargo, su concentración en fase soluble sobresale de los demás.

En el proceso de producción de material de siembra, las plantas pueden desarrollar raíces sin el aporte externo de nutrientes, solamente con el suministro de los iones que están presentes en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, los cuales deben ser tenidos en cuenta en programas de manejo integrado del agua y la fertilización.

4. Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos

4.1 Resumen

La evaluación química de los lixiviados puede servir como indicador, tanto de acumulación de sales en los sustratos, así como de contaminación a las fuentes de agua, por ejemplo por aporte de nitratos. Es así, como se realizó un estudio con el fin de evaluar las propiedades químicas: pH, CE, concentración de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y Cl^- de los lixiviados de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado ($3 \times 5 \times (3) + 8$), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). Se presentó una correlación altamente significativa entre CE, pH, K^+ y PO_4^{3-} ; y la CA mostró los mayores valores. No se presentaron concentraciones de NO_3^- en los lixiviados que sobrepasaran los rangos adecuados. Se sugiere tener en cuenta la tendencia salina y alcalina de la CA para establecer programas de riego y fertirriego.

Palabras Clave: cationes, aniones, salinidad, acidez, alcalinidad.

4.2 Introducción

En producción hortícola bajo invernadero, el manejo adecuado del agua y suministro de nutrientes es vital. Por un lado, se deben mantener óptimas condiciones de la solución del sustrato con el fin de generar una adecuada absorción de nutrientes y mantener el equilibrio osmótico, y por otro lado, es necesario prevenir la lixiviación de nutrientes con el fin de reducir la contaminación ambiental (Sonnevel y Voogt, 2009).

En Colombia, inicialmente los sustratos eran utilizados en cultivos de hortalizas, posteriormente comenzó a implementarse su uso para disminuir la presencia del patógeno *Fusarium oxysporum* f.sp. dianthi, causante de la marchitez vascular en el cultivo del clavel (Petitt, 2011). Otra de las razones para el uso de sustratos, es que permite manejar, en cierto grado, las entradas (fertirriego) y salidas (lixiviados), e identificar los nutrientes que se están acumulando, asegurando de esta manera un mayor control del sistema (Petitt, 2011), ya que los cambios químicos que ocurren en el sustrato pueden estar influenciados por su CIC, por el manejo del fertirriego durante el periodo de crecimiento y particularmente por el control de la fracción lixiviada (Charlo *et al.*, 2012). El manejo del riego tiene una influencia notable sobre la generación de lixiviados, ya que

tradicionalmente se han utilizado riegos abundantes para evitar el exceso de sales en la rizósfera, con la posterior generación de lixiviados (Lieth y Oki, 2008), debido a que uno de los errores comunes de la producción en sustrato es la acumulación de sales cuando la zona radicular no tiene suficiente lixiviación mediante irrigación (Kafkafi, 2008). Una consideración de manejo fundamental en CSS es la necesidad de mantener la salinidad de la rizósfera en niveles que no sean nocivos para la óptima producción del cultivo (Sonneveld, 2000).

El Na^+ y Cl^- son iones que se encuentran presentes en el agua, sin embargo, la mayoría de especies vegetales los absorben en pequeñas cantidades, por lo que su exceso en la solución del sustrato no es conveniente. La alta concentración de estos iones constantemente determina los requerimientos de lixiviación, aunque otros iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} o SO_4^{2-} también pueden generar esta necesidad (Sonnevel y Voogt, 2009). Además de la acumulación de sales en el medio de cultivo, otro aspecto que se debe tener en cuenta cuando se estudian los lixiviados de los sustratos es la posible contaminación que estos pueden generar; por ejemplo lixiviación de NO_3^- (Chavez *et al.*, 2008), ya que como lo mencionan Ku y Hershey (1997), la lixiviación excesiva es indeseable, debido a que puede causar contaminación ambiental. Esto sumado a que la producción sin suelo requiere riego frecuente y altas cantidades de fertilizantes, que pueden resultar en contaminación del agua superficial y subterránea (Lang y Pannuk, 1998).

El porcentaje de lixiviado en relación con la cantidad total de agua aplicada se denomina “fracción lixiviada” (Lieth y Oki, 2008). Normalmente esta fracción puede variar entre 0 y 20%, bajo condiciones bien controladas (Lieth y Oki, 2008). La fracción lixiviada es típicamente una función del grado por el cual la acumulación de sales puede convertirse en un problema. Si la fuente de agua es salina y las sales fertilizantes son aplicadas a esta agua, entonces la salinidad puede llegar a un nivel tóxico para las plantas. Si este es el caso, la cantidad de lixiviación debería ser relativamente alta. La lixiviación puede ser deseable en casos donde el agua utilizada para irrigación es de baja calidad, ya que garantizará que las sales que pueden acumularse se mueven fuera de la zona radicular. Si el agua es de alta calidad y la fertirrigación resulta en baja acumulación de sales en la rizósfera, entonces el volumen de lixiviados puede ser minimizado (Lieth y Oki, 2008). La fracción lixiviada puede ser calculada dividiendo la conductividad eléctrica del agua de riego por la conductividad eléctrica máxima tolerada en los lixiviados (Marshall *et al.*, 1996). Así, si la CE del agua de riego es un quinto de la CE del máximo deseado del lixiviado, entonces la fracción lixiviada debería ser un quinto del volumen aplicado (Lieth y Oki, 2008).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente capítulo es evaluar la composición química del lixiviado de las mezclas (orgánico-mineral) de los materiales priorizados en el capítulo dos.

4.3 Materiales y métodos

La localización, material vegetal, diseño experimental y de tratamientos fueron los mismos del capítulo 2. Como complemento, cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un

volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel, recubierta con plástico perforado en la parte inferior, depositada sobre otra canastilla lisa, donde se descargaron los lixiviados (Figura 5).

A los 7 y 24 días se analizaron en los lixiviados: CE (Conductividad Eléctrica) con el método conductimétrico – lectura a 25 °C; pH con el método potenciométrico; concentración de NO₃⁻ (método de Kjeldahl); NH₄⁺ (método de Nessler y valoración colorimétrica); PO₄³⁻ (método de cloruro estañoso y valoración colorimétrica); SO₄²⁻ (método de cloruro de bario y valoración colorimétrica); Cl⁻ (titulación con AgNO₃); K⁺ Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ (espectrofotometría de absorción atómica).

Para calcular la fracción lixiviada (FL) se realizó un experimento, donde midió la cantidad total de agua aplicada a cada sustrato y la cantidad total de agua lixiviada. La FL se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$FL (\%) = \frac{\text{Agua lixiviada}}{\text{Agua aplicada}} \times 100$$

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Conductividad eléctrica y pH

Para el factor “material de origen orgánico” (CA, CP y SC), a los siete días del ciclo de enraizamiento los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA) mostraron los más altos pH (Figura 25) y CE (Figura 24) y el sustrato de coco (SC) presentó la menor CE en los lixiviados, lo cual concuerda con su baja CE en fase soluble (Tabla 35). Sin embargo, aunque hubo una leve disminución del pH y de la CE de los 7 a los 24 días del ciclo, a los 24 ddt se evidenció el mismo patrón de comportamiento (Figura 24 y Figura 25), donde la CA presenta el mayor pH y CE y el SC el menor valor para estas dos propiedades químicas.

Para el factor “material de origen mineral” (EC, PE, PP, VE y ZE), a los siete ddt la piedra pómez (PP) fue el material de origen mineral que mayor CE y pH presentó, mientras que

la escoria de carbón (EC) mostró la tendencia contraria (Figura 24 y Figura 25). A los 24 ddt, al igual que con los sustratos de origen orgánico, se aprecia una reducción generalizada de la CE y el pH (Figura 24 y Figura 25).

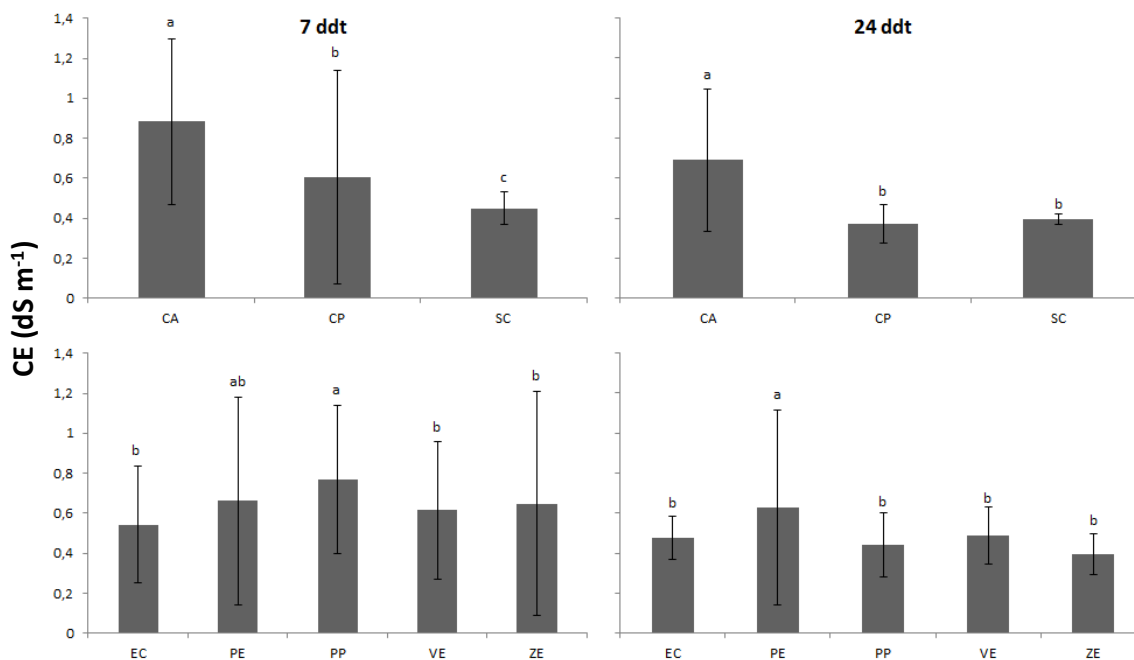


Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$; $n=15$)¹³.

Cuando se comparan todas las mezclas en sus diferentes proporciones evaluadas, se aprecia que en promedio, la CE de los lixiviados mostró tendencia a disminuir de los 7 a los 24 ddt, aunque el pH permaneció casi invariable (Tabla 50, Figura 26 y Figura 27). La CA100, que es el tratamiento testigo, presentó la mayor CE ($2,4 \text{ dS m}^{-1}$), y en consecuencia, cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que cuanto más CA hubo en la mezcla, mayor fue la CE a los 7 ddt, aunque la tendencia disminuyó notablemente a los 24 ddt (Figura 26), como efecto de la absorción de iones por parte de la planta, lo cual disminuye la cantidad de sales solubles en la rizósfera y en los lixiviados. A pesar de que la CA100 pasó de $2,4 \text{ dS m}^{-1}$ a los 7 ddt, a $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ a los 24 ddt, se observó que los lixiviados de todas las mezclas con CA presentaron la mayor CE y pH (Tabla 52), que concuerda con la comparación de los tres sustratos de origen orgánico. A diferencia de la CA, las mezclas cuyo componente orgánico es la CP, no presentaron una tendencia en la variación de la CE y el pH a medida que se modificó la proporción de CP en la mezcla (Figura 26 y Figura 27). Esto se debe a la baja CE y pH

¹³ Cada barra muestra el promedio de 15 observaciones, debido a que cada sustrato de origen orgánico se mezcló con cinco materiales de origen mineral con tres repeticiones por mezcla.

circumneutra de la fase soluble de la CP, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Tabla 39 y Tabla 40). La CE de los lixiviados de las mezclas que contienen SC fue baja, menor a los 24 ddt ($< 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) que a los 7 ddt ($< 0,7 \text{ dS m}^{-1}$) (Figura 26), esto como respuesta al proceso de absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas, no obstante, el pH tiende a aumentar sutilmente de los 7 a los 24 ddt (Figura 27).

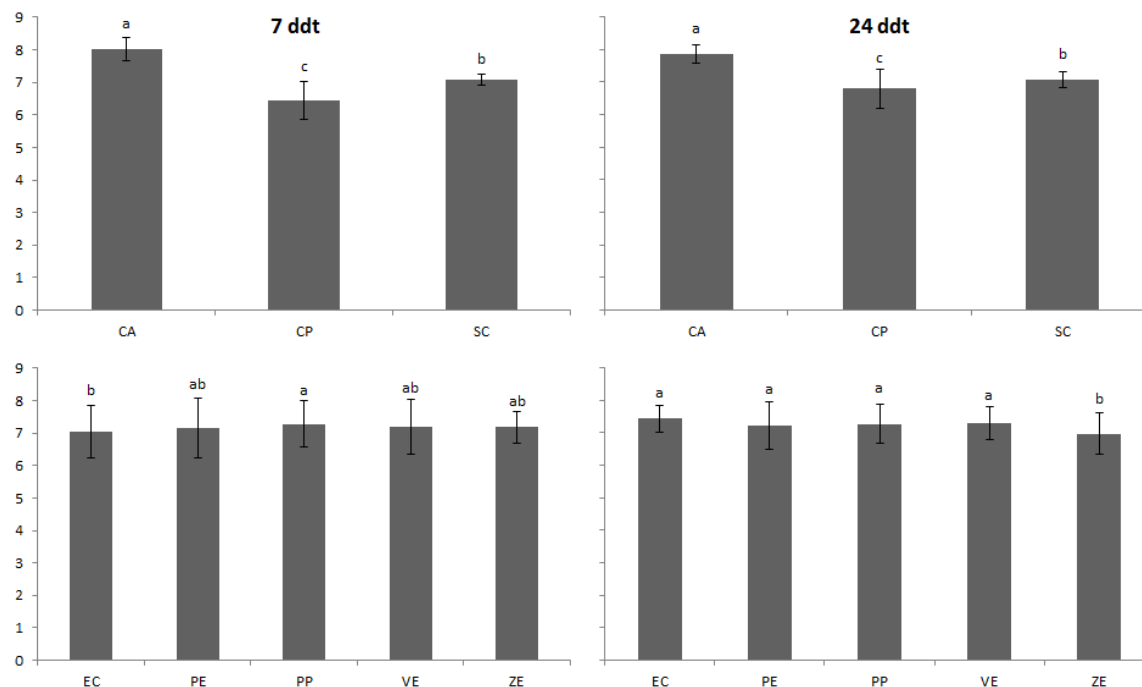


Figura 25. Comparación del pH de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Estos resultados se deben tener en cuenta en programas de fertirriego, pues aunque los valores de CE tanto del sustrato como de los lixiviados no son altos, que puedan suponer un efecto nocivo para el desarrollo de las plantas, se debe recordar que solo se aplicó agua, sin solución fertilizante, por lo que es evidente que los materiales evaluados, en su estado natural, aportan sales solubles.

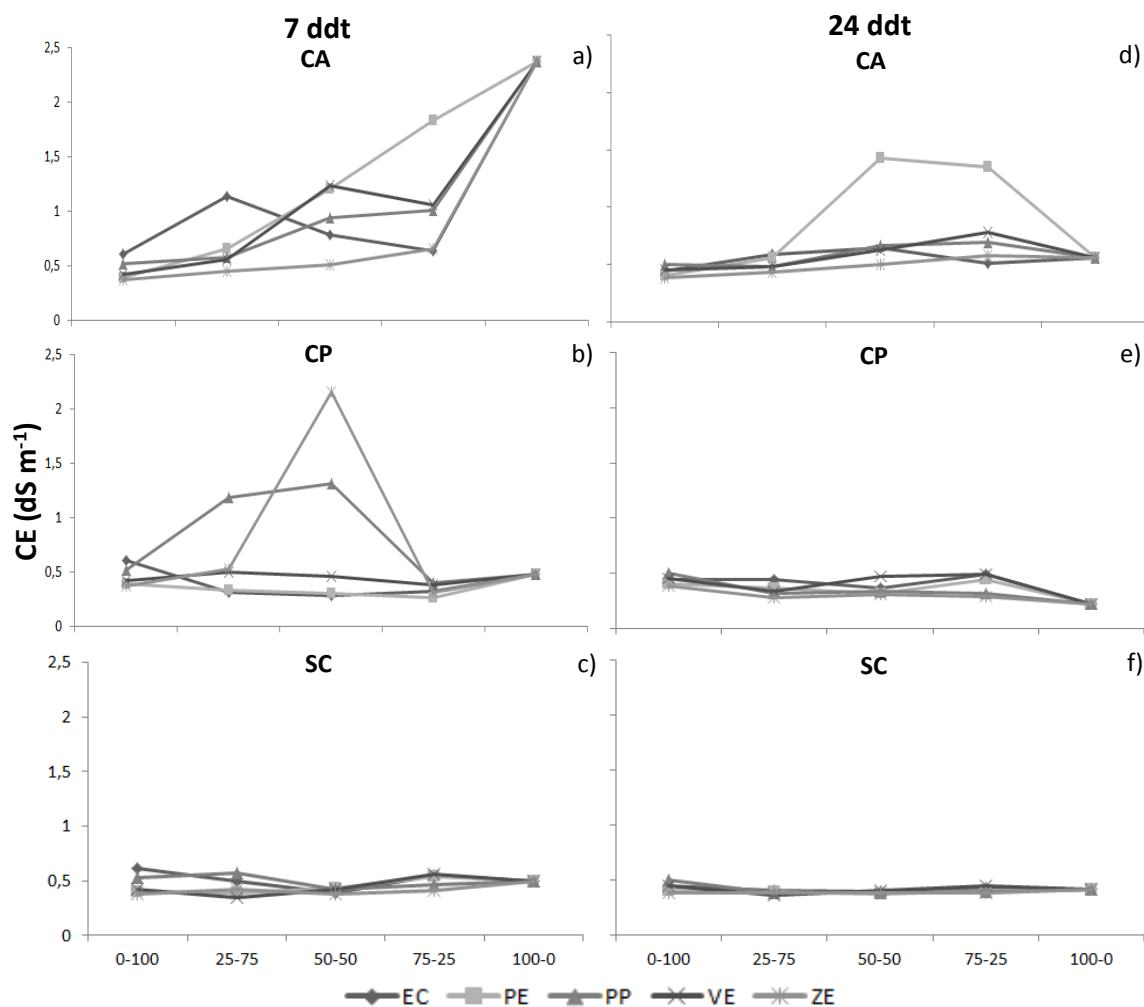


Figura 26. CE de los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

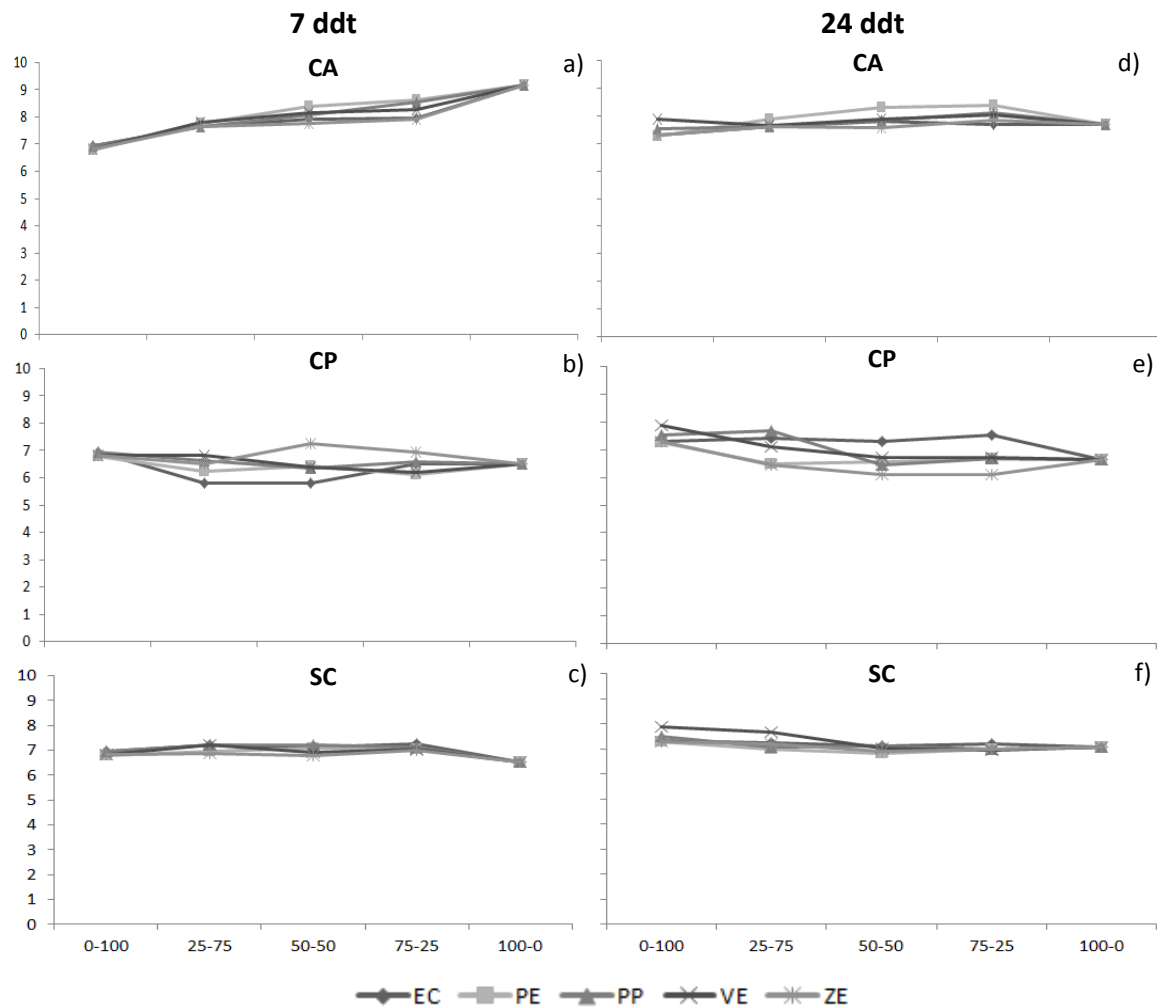


Figura 27. pH de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

4.4.2 Concentración de cationes

La concentración de K^+ y PO_4^{3-} correlacionó significativamente con la CE, lo cual puede indicar que se están disociando sales, principalmente de fosfato de potasio, provocando un incremento en la concentración de electrolitos y de la CE (Tabla 25). Estos resultados concuerdan con la correlación de los mismos iones en la solución (fase soluble) del sustrato (Tabla 21).

Tabla 25. Coeficientes de correlación de Pearson entre las propiedades y composición química de los lixiviados evaluados (n = 318).

	pH	Ca	K	Mg	Na	NO ₃	SO ₄	PO ₄	Cl	FL
CE	0,54 **	0,00	0,94 ***	0,40 *	0,39 *	0,00	0,55 **	0,87 ***	0,44 *	-0,30 *
pH	1,00	-0,10	0,45 *	0,30 *	-0,06	-0,02	-0,03	0,59 **	-0,06	-0,43 *
Ca		1,00	-0,11	0,19	0,07	-0,10	0,28	-0,14	-0,03	-0,16
K			1,00	0,39 *	0,33 *	-0,03	0,52 **	0,91 ***	0,46 *	-0,16
Mg				1,00	0,06	-0,19	0,17	0,44 *	0,28	-0,03
Na					1,00	0,01	0,55 **	0,11	0,37 *	0,04
NO ₃						1,00	0,02	-0,07	0,11	-0,18
SO ₄							1,00	0,22	0,36 *	-0,04
PO ₄								1,00	0,31 *	-0,25
Cl									1,00	0,02

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 " ".

El análisis de componentes principales (ACP) muestra que tan solo las variables K⁺ y CE tienen una agrupación específica (Figura 28), y que tan solo hasta el componente principal (CP) cuatro se alcanza una variabilidad acumulada del 72% (Tabla 27). No obstante, se presentaron diferencias multivariantes altamente significativas entre todos los factores evaluados, así como sus interacciones (Tabla 26).

Tabla 26. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados en la caracterización de lixiviados. Nivel de significancia: ("****" < 0,0001).

Factor	Ddt	Df	Wilks	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)	
Orgánico	7	2	0,00261	122,299	24	158,0	2,20E-16	***
Mineral	7	4	0,00118	30,371	48	306,4	2,20E-16	***
Proporción	7	2	0,05205	22,272	24	158	2,20E-16	***
Org:Min	7	8	0,00022	14,126	96	542,44	2,20E-16	***
Org(Prop)	7	4	0,00860	15,557	48	306,35	2,20E-16	***
Min(Prop)	7	8	0,00276	7,904	96	542,44	2,20E-16	***
Org:Min:Prop	7	16	0,00010	6,562	192	788,89	2,20E-16	***
Residuales	7	90						
Orgánico	24	2	0,00420	94,957	24	158,0	2,20E-16	***
Mineral	24	4	0,00011	62,351	48	306,4	2,20E-16	***
Proporción	24	2	0,09500	14,775	24	158	2,20E-16	***
Org:Min	24	8	0,00017	14,944	96	542,44	2,20E-16	***
Org(Prop)	24	4	0,07897	5,954	48	306,35	2,20E-16	***
Min(Prop)	24	8	0,00959	5,614	96	542,44	2,20E-16	***
Org:Min:Prop	24	16	0,00149	3,954	192	788,89	2,20E-16	***
Residuales	24							

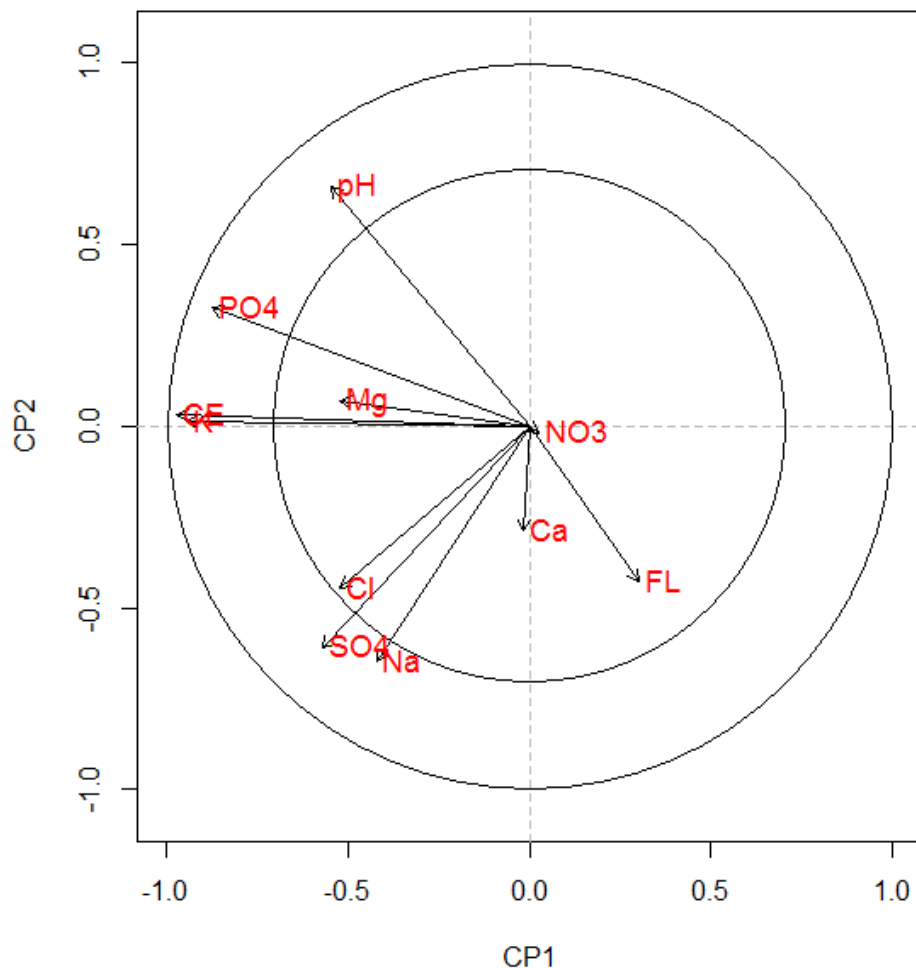


Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas en los lixiviados.

Tabla 27. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP) en la caracterización de los lixiviados. En el CP 4 de 13 se alcanzó el 72% de la variabilidad de los datos.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Desviación estándar	2,0130	1,3604	1,2282	1,1103
Proporción de varianza	0,3377	0,1542	0,1257	0,1027
Proporción acumulada	0,3377	0,4919	0,6176	0,7203

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt el SC mostró la menor concentración de Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} en los lixiviados (Figura 29), lo cual concuerda con su concentración en fase soluble (Figura 7-B), mientras que la CA contenía la mayor concentración de Ca^{2+} tanto en lixiviado, como en fase soluble. No obstante, para el caso del Na^+ , aunque el SC también presenta la menor concentración en el lixiviado (Figura 29), ocurre lo contrario en la solución del sustrato, lo cual muestra cierta afinidad de este sustrato por retener Na^+ (Abad *et al.*, 2002). El SC supera notablemente a los demás materiales orgánicos en cuanto a su capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Figura 7-

D), lo que podría explicar su baja concentración de cationes en fase soluble (Figura 7-B) y en sus lixiviados (Figura 29), y la alta concentración de cationes en fase intercambiable (Figura 7-D). La cascarilla de palma (CP) presenta la tendencia contraria, menor CIC y mayor concentración de cationes en fase soluble y lixiviado (Figura 29).

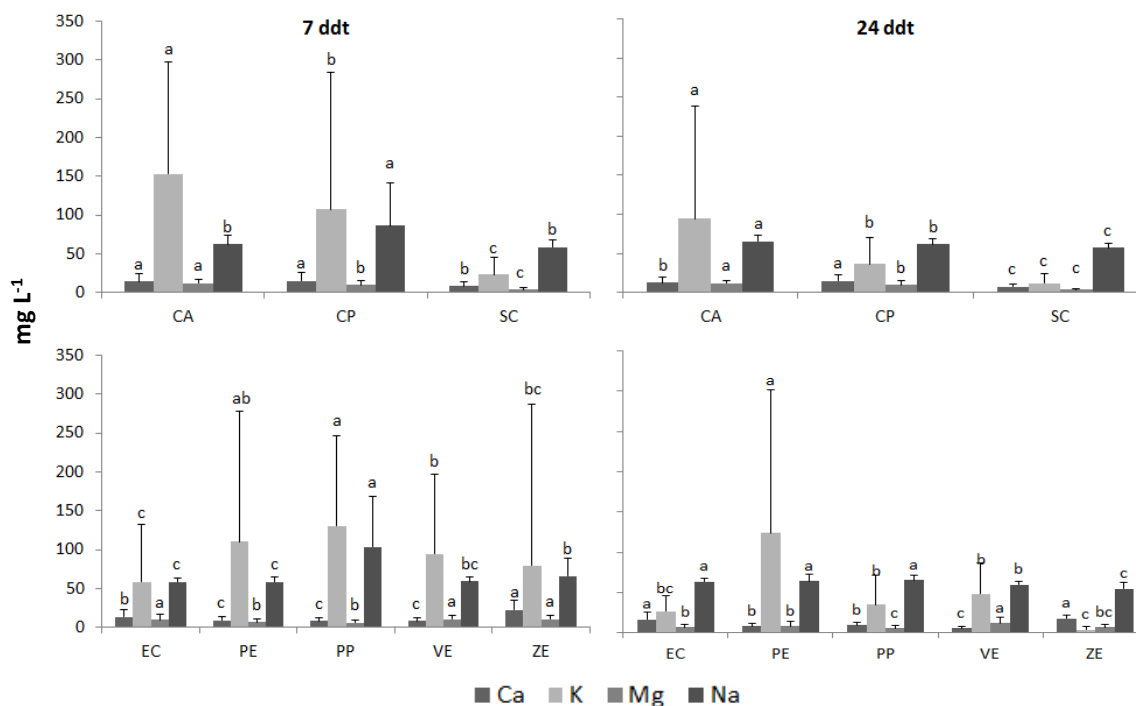


Figura 29. Concentración de cationes de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt no hay una tendencia clara, pues la ZE contenía la mayor concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que la PP contenía la mayor concentración de K^+ y Na^+ (Figura 29). No obstante, a excepción del Ca^{2+} de la ZE, esta tendencia no se presentó en la fase soluble de los sustratos de origen mineral, pues la VE presentó la mayor concentración de K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en esta fase (Figura 29). No hay una diferencia en la concentración de cationes de los 7 a los 24 ddt, como si la hubo entre los sustratos de origen orgánico. Los cambios más substanciales los presenta la ZE, debido a que a los 7 ddt generaba la mayor cantidad de Mg^{2+} en los lixiviados y a los 24 ddt ocurría lo contrario, lo cual concuerda con su concentración de Mg^{2+} en la fase soluble del sustrato, pues a los 7 ddt estaba entre los de mayor concentración (Figura 29), mientras que a los 24 ddt esta concentración disminuía (Figura 29). De igual forma, la EC mostraba a los 7 ddt la menor concentración de Na^+ , mientras que a los 24 ddt sus lixiviados contenían la mayor concentración de este catión (Figura 29).

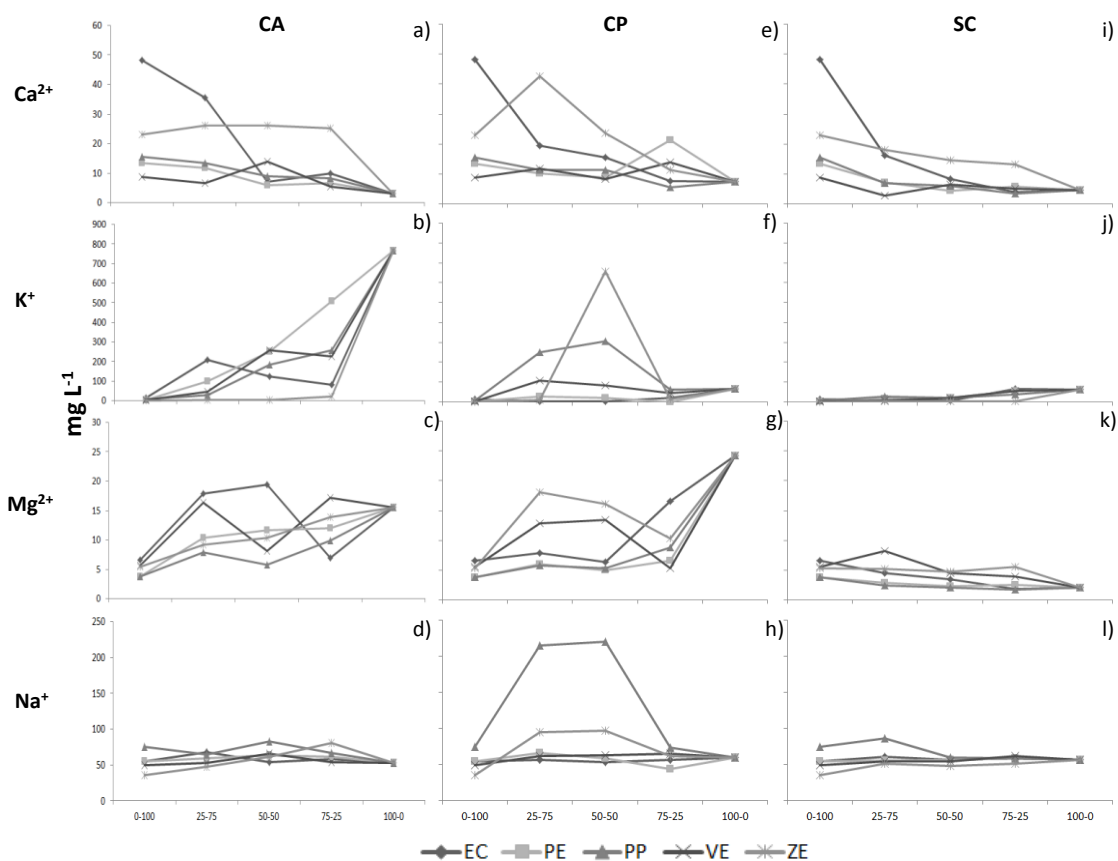


Figura 30. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la concentración de Ca²⁺ disminuye a medida que aumenta el contenido de CA en la mezcla, aunque esta situación es más marcada a los 7 que a los 24 ddt (Figura 30 y Figura 31), esto obedece a la baja concentración de Ca²⁺ de los lixiviados de la CA (Tabla 46), y en fase soluble (Tabla 36). La alta concentración de K⁺ (Tabla 46, Figura 30 y Figura 31) y SO₄ (Tabla 47) en los lixiviados de la CA podrían explicar su elevada CE. Sin embargo, esta situación se presentó a los 7 ddt (Figura 30), mientras que a los 24 ddt (Figura 31) la concentración de K⁺ disminuye notablemente, lo cual explica la disminución de la CE de la CA de los 7 a los 24 ddt. Se aprecia una leve tendencia de aumento en la concentración de Na⁺ en los lixiviados a medida que se incrementa el contenido de CA en la mezcla, que se explica por la mayor concentración de Na⁺ en fase soluble, comparado con la mayoría de los materiales de origen mineral (a excepción de la VE), lo cual ocurre tanto a los 7 (Tabla 38) como a los 24 ddt (Tabla 40). A medida que aumenta el contenido de CP en la mezcla, la concentración de Ca²⁺ en los lixiviados disminuye (Figura 30), esto se debe a que la CP tiene una menor concentración de Ca²⁺ en fase

soluble, comparado con la mayoría de materiales de origen mineral (a excepción de VE y ZE) (Tabla 38), en consecuencia, se presenta una menor concentración de Ca^{2+} en los lixiviados de aquellas mezclas que contienen un mayor contenido de CP (Tabla 46). Esta situación permanece a los 24 ddt (Figura 31), aunque de forma menos marcada. La concentración de K^+ y Na^+ permanece casi invariable a los 24 ddt a medida que aumenta el contenido de CP en los lixiviados (Figura 31), no obstante, a los 7 ddt no es tan claro el comportamiento para los cationes K^+ , Mg^{2+} y Na^+ (Figura 30). A medida que el contenido de SC aumenta en la mezcla, en los lixiviados la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} disminuye, la de K^+ se incrementa y la de Na^+ permanece casi invariable (Figura 30), lo cual obedece, a que cuando se compara la concentración de cationes en el lixiviado del SC con la de los materiales de origen mineral, se aprecia que la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} es menor, la de K^+ es mayor y la de Na^+ no presenta diferencias marcadas (Tabla 46).

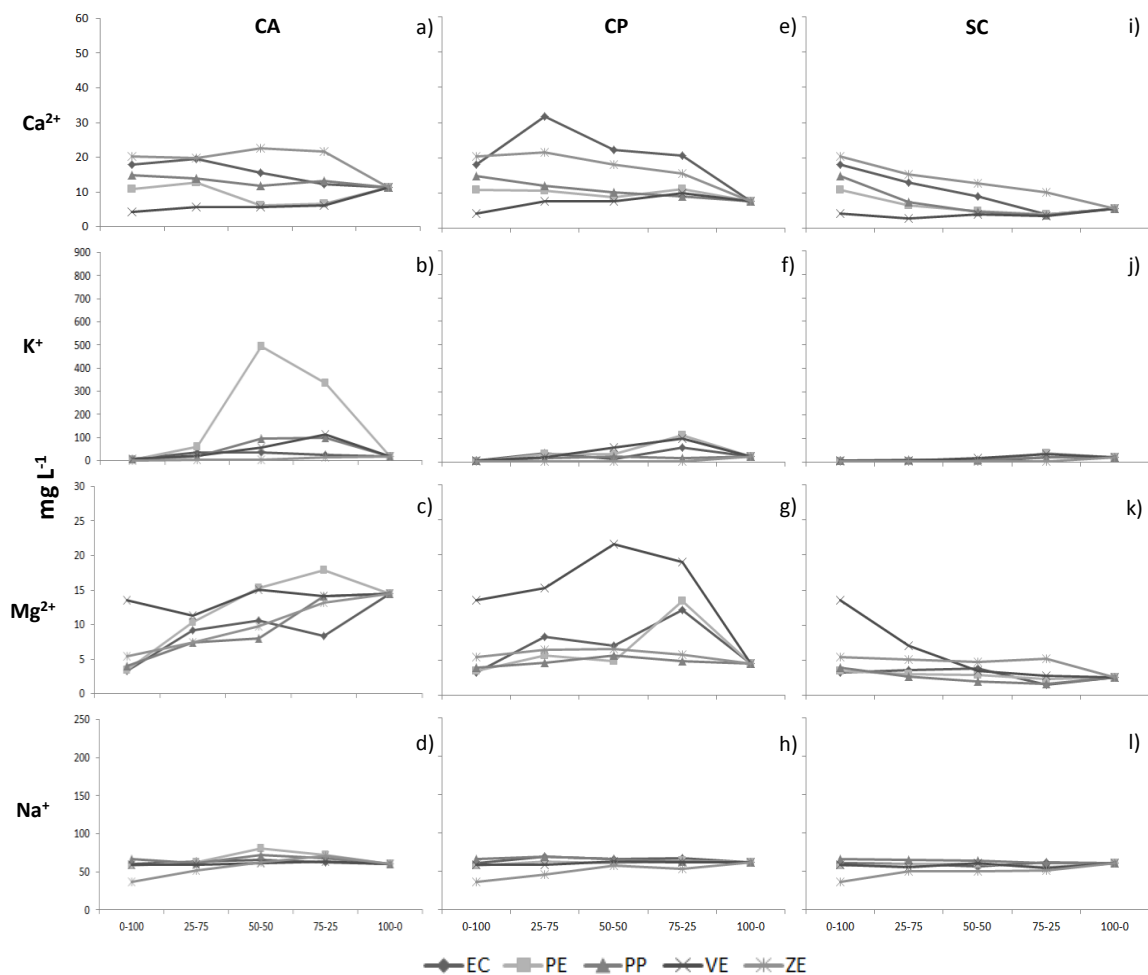


Figura 31. Concentración de cationes en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

La concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos a los 24 ddt tiende a equilibrarse, independiente del contenido de material orgánico en el sustrato (Figura 31), ya que las pendientes de las curvas tienden a disminuir de los 7 a los 24 ddt (Figura 30 y Figura 31). Esta situación obedece al aumento de la generación de raíces, lo cual incrementa la cantidad de iones absorbidos por parte de las plantas, esto implica una disminución en la concentración de iones en fase soluble y en los lixiviados.

4.4.3 Concentración de aniones

Para el factor “material de origen orgánico”, a los siete ddt de los tres sustratos evaluados, los lixiviados del SC tienen una mayor concentración de NO_3^- , mientras que contienen la menor concentración de SO_4^{3-} , PO_4^{2-} y Cl^- (Figura 32), contrario a lo que ocurre en fase soluble, donde el SC presenta la mayor concentración de Cl^- y SO_4^{3-} (Figura 7-B), que sugiere una mayor capacidad de intercambio aniónico, lo cual le permite retener estos aniones con mayor fuerza, comparado con la CA y la CP. Cabe aclarar, que la disminución de la concentración de todos los aniones y los cationes Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} de los 7 a los 24 ddt (Figura 32 y Figura 30, respectivamente) en los lixiviados, coincide con la disminución de su CE.

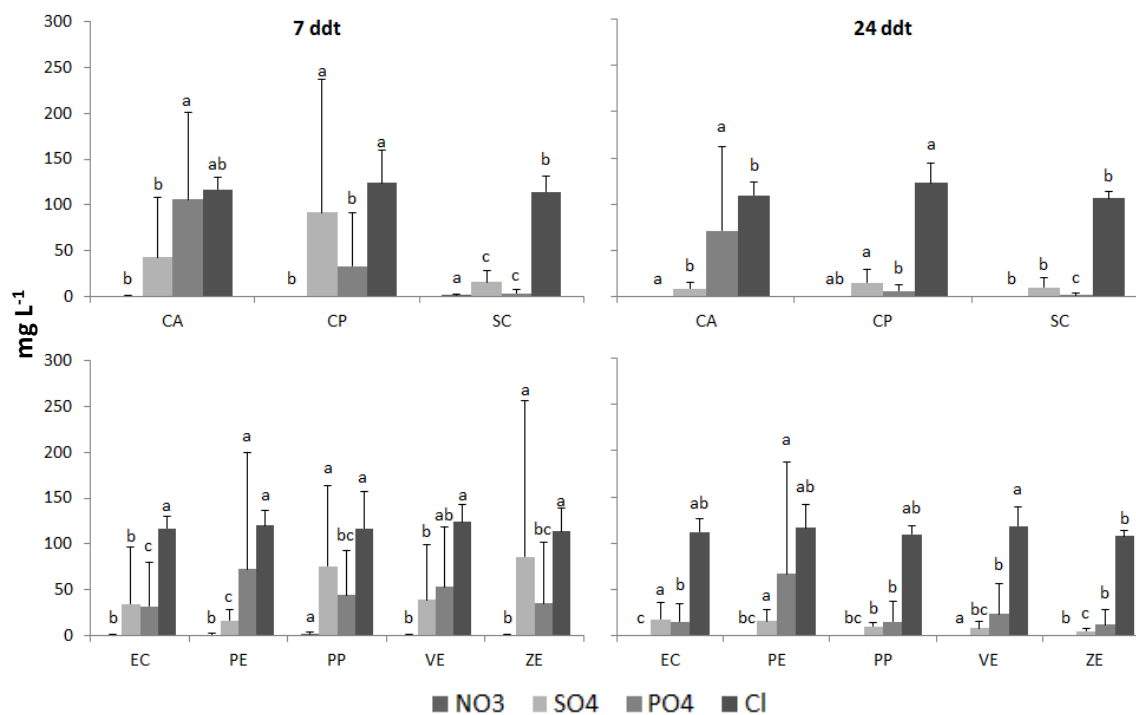


Figura 32. Concentración de aniones de los lixiviados de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Para el factor “material de origen mineral”, a los siete ddt el NO_3^- en los lixiviados estuvo por debajo de los 2 mg L^{-1} , que está dentro del rango adecuado reportado por Lu *et al.*

(2011), siendo la PP la que mayor concentración presentó (Figura 32). De igual forma, la PP mostró la mayor concentración de SO_4^{2-} y la PE la de PO_4^{3-} , en cuanto al Cl^- no se presentaron diferencias significativas (Figura 32). A los 24 ddt los aniones tampoco mostraron una tendencia clara, las principales diferencias se presentaron con la ZE, debido a que a los 7 ddt mostraba la mayor concentración de SO_4^{2-} , mientras que a los 24 ddt tenía la menor concentración, no obstante, la concentración de este anión en la fase soluble del sustrato siempre fue la menor de los cinco materiales evaluados (Figura 32).

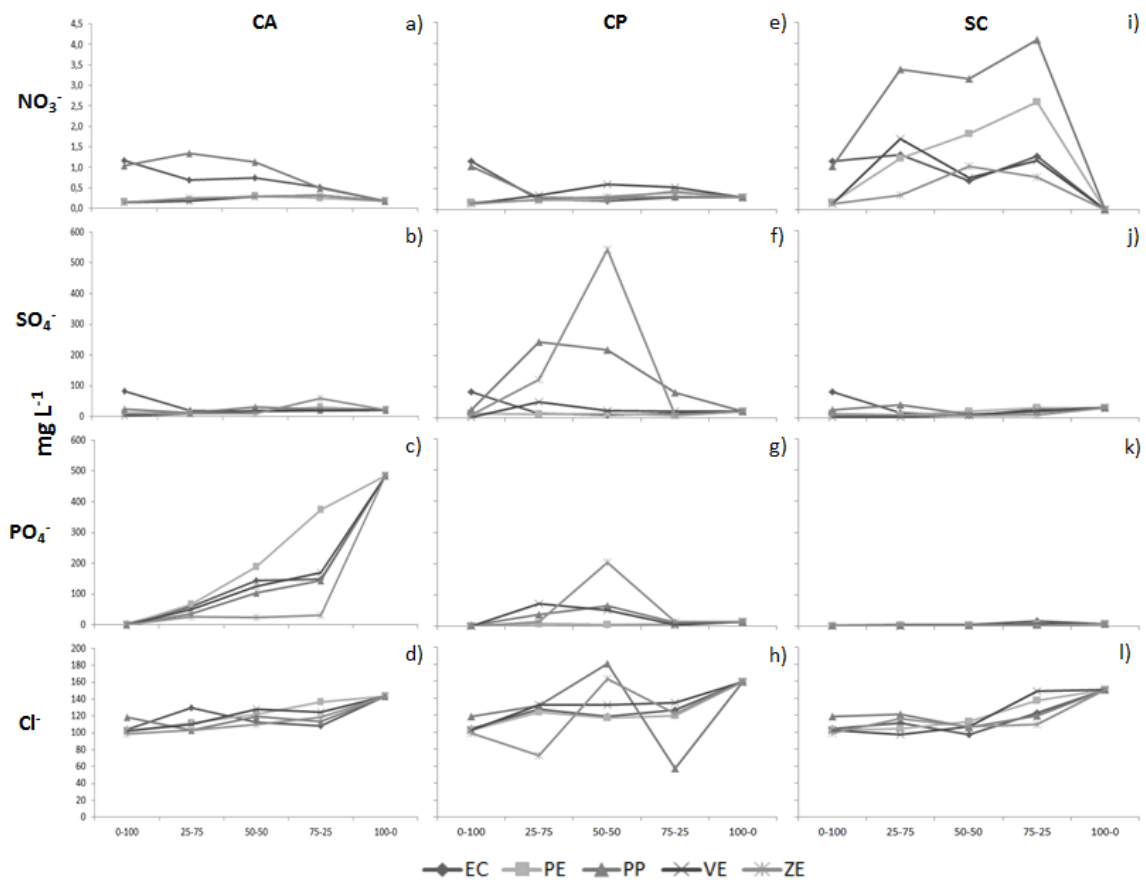


Figura 33. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 ddt; n=3.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que a excepción de la EC y la PP, los demás materiales de origen mineral sin mezclar mostraron la menor tendencia a perder NO_3^- mediante los lixiviados (Tabla 48), lo cual concuerda con lo mostrado en la Figura 33, donde se evidencia que a medida que se incrementa el contenido de CA en el sustrato, aumenta sutilmente la concentración de NO_3^- en el lixiviado, esto ocurre tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 33 y Figura 34, respectivamente). Todos los sustratos que tienen CA presentan la mayor concentración de PO_4^{3-} en los lixiviados (Tabla 53), que concuerda con su alta concentración en fase

soluble (Tabla 35 y Tabla 37), no obstante, esta concentración se reduce notablemente de los 7 (Figura 33) a los 24 ddt (Figura 34). Aunque a los 7 ddt la concentración de Cl^- aumenta levemente con el incremento en el contenido de CA de los sustratos (Figura 33), a los 24 ddt la concentración de este anión permanece casi invariable con las diferentes mezclas (Figura 34).

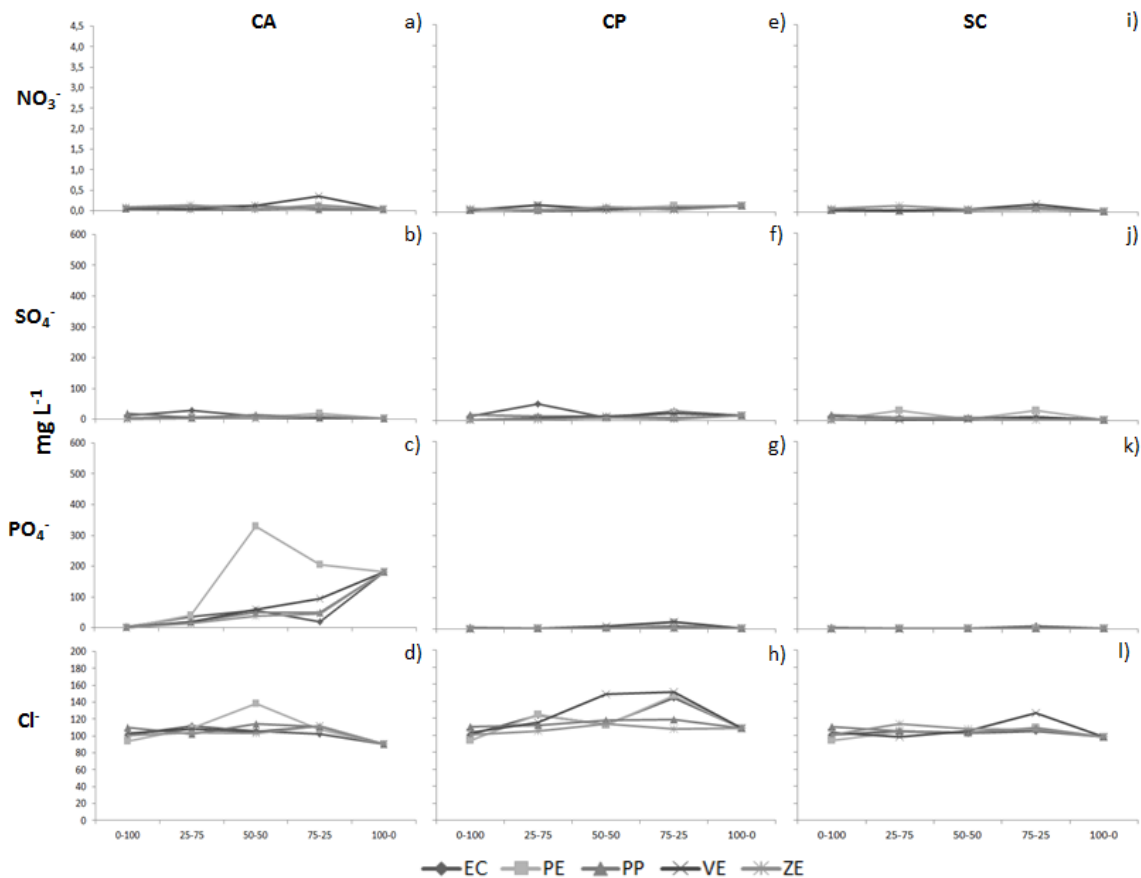


Figura 34. Concentración de aniones en los lixiviados de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 24 ddt; n=3.

A los 7 ddt no se presentan tendencias claras que muestre una influencia notable del contenido de CP sobre la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (Figura 33), no obstante, a los 24 ddt la concentración de los aniones en los lixiviados comienza a estabilizarse hasta el punto de que no se presentan diferencias notables entre los sustratos que contienen CP (Figura 34).

Al igual que con la CP, a los 7 ddt no se evidencian tendencias claras que indiquen la influencia del contenido de SC sobre la concentración de aniones en los lixiviados de las mezclas que lo contienen (Figura 33), mientras que a los 24 ddt esta concentración tiende a estabilizarse, independientemente de la proporción de SC en la mezcla (Figura 34).

Al igual que con la concentración de cationes, la concentración de aniones de los lixiviados varía ampliamente de los 7 a los 24 ddt, como respuesta al incremento de la absorción de nutrientes que la planta genera en este lapso de tiempo, provocado por el aumento del área radicular.

4.4.4 Fracción lixiviada

Los materiales que presentaban una mayor fracción lixiviada (FL) a los 7 ddt, se mantuvieron a los 24 ddt, siendo la EC100 la de mayor y CP_PE la de menor FL (Tabla 53). La CA100, que es el tratamiento testigo, es uno de los que tiene menor FL (Tabla 47 y Tabla 48), lo que junto a la mayor CE ($2,4 \text{ dS m}^{-1}$) y pH (9,2), podría indicar una tendencia a acumular sales.

Para el factor “material orgánico”, a los 7 ddt la CA presentó el mayor porcentaje de FL (Figura 35), probablemente en respuesta a haber sido quemada al 80%, lo cual incrementó notablemente su capacidad para retener agua, por ende, disminuyó su FL. De igual forma, a los 24 ddt la FL mantiene su tendencia, donde la CA es la que menos lixiviados genera, seguida por el SC (Figura 35). No obstante, aunque esta baja FL indica una menor generación de lixiviados, también puede implicar una mayor tendencia a la salinización del sustrato (Kafkafi, 2008).

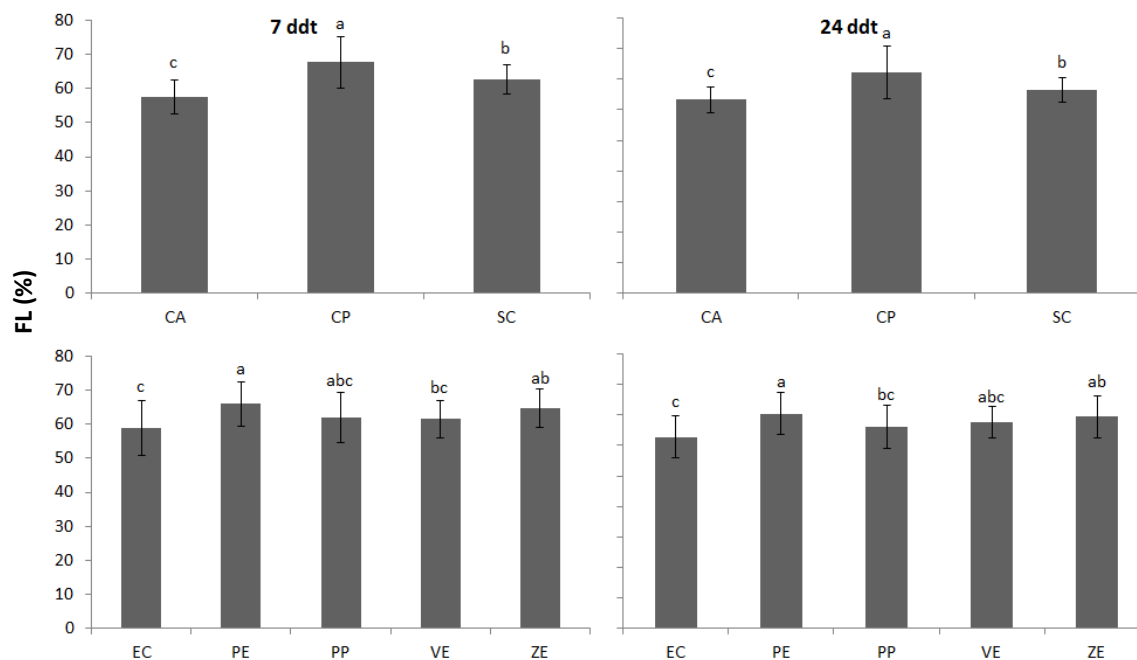


Figura 35. Comparación de la fracción lixiviada (FL) de los sustratos de origen orgánico y mineral evaluados a los 7 y 24 días después de siembra. Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

A los 7 ddt Todos los materiales de origen mineral presentan una FL menor al 70%, no obstante, la EC y la VE presentaron la menor FL, que indica que estos sustratos tienen una mayor capacidad de retención de humedad (Figura 35). Aunque la FL aumentó de

los 7 a los 24 ddt para todos los sustratos, la tendencia entre estos se mantuvo casi intacta, pues la EC presentaba la menor FL, mientras que la PE mostraba la mayor, lo cual se presentó a los 7 y a los 24 ddt (Figura 35).

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se aprecia que a los 7 ddt no hay efecto del contenido de CA sobre la FL del sustrato, no obstante, a los 24 ddt la FL tiende a reducirse a medida que aumenta la proporción de CA en la mezcla (Figura 36), como respuesta a un aumento en la capacidad de retención de humedad de los sustratos que contienen CA. A diferencia de la CA, los sustratos con CP aumentaban su fracción lixiviada a medida que se incrementaba la proporción de esta en la mezcla, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 36). Esto obedece a que la CP tiene una alta FL, por ende, una baja capacidad de retención de humedad (Tabla 49). La FL de las mezclas que contienen SC tiende a permanecer invariable a medida que aumenta la proporción de SC en la mezcla, tanto a los 7 como a los 24 ddt (Figura 36). Esto debido a que la FL del SC y de los materiales de origen mineral es similar (Tabla 47 y Tabla 51).

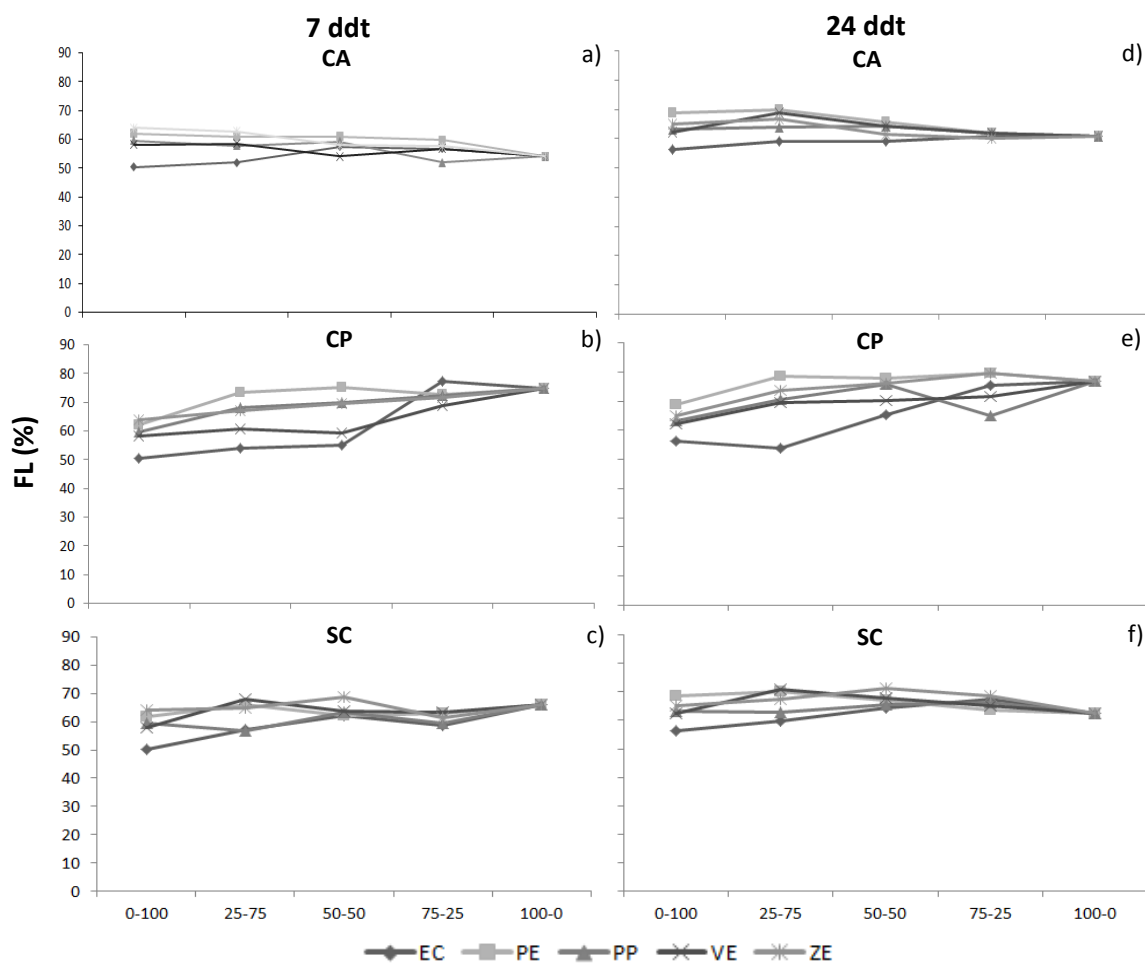


Figura 36. Fracción lixiviada (FL) de la cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclados en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a los 7 y 24 ddt; n=3.

4.5 Conclusiones

Los sustratos que contienen cascarilla de arroz quemada muestran una tendencia a acumular sales, indicada por su alta conductividad eléctrica y baja fracción lixiviada, pues tradicionalmente, el exceso de sales se disminuye por medio del proceso de lixiviación. Y aunque la conductividad eléctrica se encuentra en niveles aún adecuados, es necesario tener en cuenta que la caracterización de los lixiviados se realizó en sustratos a los cuales no se les había aplicado soluciones fertilizantes; al fertilizar está va aumentar significativamente, lo cual debe tenerse en cuenta en programas de riego y fertilización.

Se presenta una alta correlación entre la concentración de potasio y fosfato, y entre estos y la conductividad eléctrica y el pH, tanto en los lixiviados como en la fase soluble de los sustratos, lo que sugiere que estos iones están generando la acumulación de sales de fosfato de potasio.

No se presentaron concentraciones importantes de nitratos en los lixiviados, lo que sugiere que los materiales evaluados no liberan este anión en cantidades que puedan ser nocivas para el ambiente.

Se aprecian diferencias notables entre la concentración de iones de los lixiviados, de los 7 a los 24 ddt, tendiendo a disminuir y equilibrarse su concentración a los 24 ddt, independiente de los materiales que contienen la mezcla. Esto se puede explicar por el hecho de que a medida que la planta crece genera una mayor cantidad de raíces, lo que aumenta su absorción, por consiguiente, la concentración de iones disminuye en la fase soluble de los sustratos y esto genera una disminución de la cantidad de iones descargada en los lixiviados.

5. Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos.

5.1 Resumen

Se realizó una investigación para evaluar el comportamiento de tres materiales de origen orgánico: cascarilla de arroz (CA), cascarilla de palma (CP) y sustrato de coco (SC) mezclado con cinco materiales de origen mineral: escoria de carbón (EC), perlita (PE), piedra pómez (PP), vermiculita (VE) y zeolita (ZE), en tres proporciones: 75-25, 50-50 y 25-75, sobre el porcentaje de prendimiento de raíces, la ganancia de peso fresco de raíces (Pf. Raíz) y brotes (Pf. Aérea) y la concentración de macro y micronutrientes de esquejes de clavel. Se estableció un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tratamientos factorial incompleto, anidado en 3 etapas, con grupo control aislado (3X5X(3)+8), con tres factores: factor 1) material de origen orgánico, con 3 niveles; factor 2) material de origen mineral; con 5 niveles y factor 3) proporción (anidado); con 3 niveles, más los 8 materiales sin mezcla (grupo control aislado), para un total de 53 tratamientos (sustratos). El porcentaje de prendimiento fue del 100% en todos los sustratos evaluados. Aunque se presentaron diferencias en cuanto a la concentración de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn y B) en tejido vegetal, no hubo una correlación significativa entre esta concentración y el Pf. Raíz. Los esquejes ganaron mayor Pf. Raíz en aquellas mezclas con SC, mientras que la CP no presentó diferencias significativas con la CA, por lo que la CP se muestra como un material promisorio para ser utilizado en sistemas de cultivo sin suelo. Los materiales de origen mineral no mostraron una tendencia que evidenciara una influencia clara de algún material en particular, sobre el Pf. Raíz. Los sustratos que generaron un mayor Pf. Raíz, mostraron adecuadas relaciones iónicas N/P, N/S, N/K, C/K y Ca/B y Mg/Mn.

Palabras Clave: cultivo sin suelo, escoria de carbón, perlita, piedra pómez, vermiculita y zeolita.

Abreviaciones:

CSS	Cultivo sin suelo
CA	Cascarilla de arroz
CP	Cascarilla de palma
SC	Sustrato de coco
EC	Escoria de Carbón
PE	Perlita
PP	Piedra Pómez
VE	Vermiculita
ZE	Zeolita

5.1 Introducción

La absorción de nutrientes por las plantas puede verse afectado por las propiedades químicas de los sustratos o los constituyentes de los mismos, ya que estos contienen nutrientes que pueden estar disponibles para las raíces y las fluctuaciones de pH puede condicionar su movilización o inmovilización (Sonnevel y Voogt, 2009). Según Benton (2005), el proceso de absorción de elementos por las plantas que crecen en sustratos orgánicos, tales como sustrato de coco y turba, ocurrirá de manera similar que en el suelo, donde los principios de flujo de masa, difusión y extensión de raíces afectarán significativamente su crecimiento. Así mismo, las plantas que crecen en sustratos inorgánicos como vermiculita, zeolita o arcillas expansivas, las cuales tienen capacidad de intercambiar cationes, también actuarán de forma similar a las plantas que crecen en suelo (Benton, 2005).

Tabla 28. Niveles de nutrientes (en base seca) reportados para clavel en la sabana de Bogotá. Fuente: Ortega (1997).

Elemento	Deficiencia	Normal	Óptimo	Exceso
N (%)	< 3,0	3,2 - 5,2	4,2	> 5,26
P (%)	< 0,15	0,2 - 0,35	0,25	> 0,36
K (%)	< 2,0	2,5 - 6,3	4	> 6,3
Ca (%)	< 0,6	1,0 - 2,0	1,5	> 2,1
Mg (%)	< 0,15	0,25 - 0,5	0,38	> 0,56
Mn (mg Kg ⁻¹)	< 30	100 - 300	200	> 800
Fe (mg Kg ⁻¹)	< 30	50 - 150	100	> 200
B (mg Kg ⁻¹)	< 25	40 - 80	60	> 100
Mn (mg Kg ⁻¹)	< 5	8 - 30	20	> 36
Zn (mg Kg ⁻¹)	< 15	25 - 75	50	> 80

En Colombia, el clavel (*Dianthus caryophyllus*) se siembra casi exclusivamente en CSS, debido a que los productores han enfrentado una compleja problemática de índole fitosanitaria, no solo por la alta incidencia del hongo *Fusarium oxysporum*, sino también por la presencia de nematodos, sinfílidos y colémbolos, así como los altos costos ocasionados por la adecuación de los terrenos afectados por estos patógenos (tratamientos de desinfección de suelo) (Cárdenas *et al.*, 2006). Como sustrato para el cultivo de clavel en CSS se ha utilizado casi exclusivamente la cascarilla de arroz (CA), debido a su amplia disponibilidad y bajo costo. No obstante, las áreas sembradas en este sistema y para este cultivo, están creciendo¹⁴ y la disponibilidad de CA está disminuyendo¹⁵. Debido a esto, en Colombia se han desarrollado investigaciones con diferentes materiales, tales como sustrato de coco, escoria de carbón y zeolita,

¹⁴ Existen aproximadamente 5000 ha sembradas en rosa, y aproximadamente 500 de esas 5000 en sustrato. Cada año más fincas de producción de rosa trasladan su producción de rosa en suelo a sustrato (Asocolflores, 2013).

¹⁵ Debido a los TLCs se está viendo amenazada la producción de arroz en Colombia (Quintero, 2013).

mezclados en diferentes proporciones entre ellos, o mezclados con CA, obteniendo resultados satisfactorios (Flórez *et al.*, 2006; Ulloa *et al.*, 2006; Chaparro *et al.*, 2006; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Monsalve *et al.*, 2009; Peña *et al.*, 2009; Petitt, 2011). En la Tabla 28 se pueden apreciar los niveles óptimos de nutrientes en el tejido vegetal de la planta de clavel, así como sus relaciones catiónicas óptimas en la Tabla 29.

Con base en lo anterior, se define como objetivo del presente capítulo, identificar los sustratos más promisorios, en función de la respuesta en establecimiento, crecimiento y concentración de nutrientes de esquejes de clavel.

5.1 Materiales y Métodos

La localización, material vegetal, diseño experimental y de tratamientos fue el mismo establecido en el capítulo 2. Como complemento, cada UE consistió en una canastilla plástica de 0,6m de largo por 0,3m de ancho y 0,15m de alto, para un área de 0.18 m², y un volumen de 0,03 m³, con 104 esquejes de clavel, recubierta con plástico perforado en la parte inferior, depositada sobre otra canastilla lisa, donde se descargaron los lixiviados (Figura 5).

Tabla 29. Relaciones catiónicas óptimas en tejido vegetal de clavel, establecidas para los elementos expresados en mg Kg⁻¹. Fuente: Medina, 2006.

Relación	Intervalo
N/P	7 - 13
N/S	7 - 15
N/K	0,7 - 1,4
N/Cu	3400 - 4600
P/S	0,7 - 1,8
P/Zn	18 - 52
K/Mg	6 - 12
K/Na	10 - 60
Ca/K	0,2 - 0,9
Ca/Mg	3,5 - 5,8
Ca/Mn	50 - 180
Ca/B	210 - 590
Ca/Na	4 - 30
Mg/Mn	10 - 45
Fe/Mn	0,5 - 1,5
Fe/Cu	0,5 - 2,6
Fe/Zn	9 - 25

Con el fin de determinar cuál o cuáles sustratos generaron un adecuado crecimiento de los esquejes de clavel, cuando se cumplió su ciclo de enraizamiento, se evaluó:

- Porcentaje de prendimiento, extrayendo de cada UE 10 esquejes, de esta forma se determinó cuantos de estos esquejes se enraizaron satisfactoriamente al

sustrato. Cada esqueje enraizado, de los 10 extraídos, representaba el 10%. Al final se sumó la cantidad de esquejes enraizados y se obtuvo el porcentaje de prendimiento.

- Peso fresco de raíz (Pf. Raíz) y peso fresco de parte aérea (Pf. Aérea), dividiendo los esquejes entre brotes y raíces y pesándolos inmediatamente después de extraídos de los bancos de enraizamiento.
- Se determinó en tejido foliar el contenido de N total, con el método micro-Kjeldahl y valoración volumétrica; P total por Calcinación a 475°C y valoración colorimétrica con molibdato y vanadato de amonio; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn totales con calcinación a 475°C y valoración por espectrofotometría de absorción atómica; S total por incineración con nitrato de magnesio y turbidimetría; y B total, con calcinación a 475°C y valoración colorimétrica con azometina-H.

Se realizó una matriz de correlación, al igual que un análisis de componentes principales (ACP) para definir si existe relación entre las variables estudiadas. Con el fin de definir si los tratamientos evaluados tienen efecto multivariante, se realizó un análisis de varianza multivariado (Manova). Además, para determinar si existen diferencias univariantes entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis de varianza univariado (Anova) y una prueba de comparación múltiple de Tuckey. Este análisis se hizo para material de origen orgánico más testigos control, material de origen mineral más testigos control, interacción y tratamiento. A todas las variables, previo a su análisis univariante y multivariante se les realizaron pruebas de normalidad (Shapiro) y de homogeneidad de varianzas (Bartlett).

El procesamiento de los datos se realizó con los softwares R-Project x64 3.1.3 y R-Studio, paquetes mvoutlier (Filzmoser y Gschwandtner, 2015), agricolae (Mendiburu, 2015), nlme (Pinheiro *et al.*, 2016) y lattice (Sarkar, 2008).

5.2 Resultados y Discusión

5.2.1 Porcentaje de prendimiento y peso fresco de brotes y raíz

Tabla 30. Respuesta multivariante de los tratamientos evaluados. Nivel de significancia: (“****” <0,0001); (“***” 0,001); (“**” 0,01); (“.” 0,05).

FACTOR	Df	Wilks	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)	
Orgánico	2	0,0038	83,46500	28	154	0,0	***
Mineral	4	0,0054	15,24100	56	301,69	0,0	***
Proporción	2	0,1416	9,11700	28	154	2,2E-16	***
Org:Min	8	0,0038	5,98100	112	551,59	2,2E-16	***
Org(Prop)	4	0,0427	6,73400	56	301,69	2,2E-16	***
Min(Prop)	8	0,0026	6,56900	112	551,59	2,2E-16	***
Org:Min:Prop	16	0,0004	4,14600	224	847,79	2,2E-16	***
Residuales	90						

Todos los esquejes se anclaron a los sustratos evaluados, es decir, hubo un porcentaje de prendimiento del 100%. Además, una vez finalizó el ciclo de propagación, estos

mismos esquejes fueron trasplantados a su sitio de producción definitivo, lo cual indica que los materiales, mezclas y proporciones evaluados, fueron viables para ser utilizados como medio de propagación de esquejes de clavel.

Aunque las variables evaluadas tienen un efecto multivariante sobre la respuesta de los esquejes de clavel sembrados en diferentes mezclas de sustratos de origen orgánico y mineral, y sus interacciones (Tabla 30), la matriz de correlación (Tabla 32) no muestra tendencias claras, lo que se puede corroborar con el análisis de componentes principales (ACP), donde los dos primeros componentes principales (CP), tan solo representan el 39% de la variabilidad total de los datos, y solo hasta el cuarto CP se obtiene más del 60% de esta variabilidad (Tabla 33).

Tabla 31. Variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel al momento de la siembra en sustratos. Pf. Aérea = Peso fresco de parte aérea (brotes); Pf. Raíz = Peso fresco de raíz.

Pf Aérea	Pf Raíz	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
g		%							mg Kg ⁻¹			
5,50	0,00	4,41	0,68	5,23	1,02	0,42	0,15	134,0	9,0	269,0	375,0	232,0

El peso fresco de parte aérea (Pf. Aérea) y peso fresco de raíz (Pf. Raíz) no presentaron correlación (Tabla 32), debido a que en la etapa evaluada la planta prácticamente no tiene crecimiento de brotes, no hay una ganancia de peso importante en la parte aérea, con un promedio de 5,5 g antes de ser trasplantados (Tabla 31) y de 5.9 g al final del ciclo de enraizamiento, lo que indica que en los 24 días del ciclo tan solo ganaron 0,4 g de peso, mientras que el crecimiento de raíces es notable, pues las plantas se concentran en producir raíces, las cuales, ausentes al momento de la siembra, al finalizar el ciclo de enraizamiento alcanzaron un peso fresco promedio de 6,2 g.

Tabla 32. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables de crecimiento y composición química del tejido vegetal de los esquejes de clavel evaluados.

	Pf Aérea	Pf Raíz	N	P	Ca	K	Mg	S	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	B
Pf Aérea	1,00	0,03	0,14	0,15	0,10	0,20	-0,02	0,23	0,08	-0,15	0,07	0,11	0,11	0,02
Pf Raíz		1,00	0,09	-0,09	0,08	-0,06	0,06	0,07	-0,15	0,08	-0,20	-0,19	-0,20	-0,23
N			1,00	0,24	0,48 *	0,17	0,01	0,49 *	0,15	0,09	0,14	0,32 *	-0,18	-0,14
P				1,00	0,62 **	0,53 **	0,21	0,48 *	-0,05	-0,45 *	-0,19	0,07	0,16	-0,01
Ca					1,00	0,45 *	0,22	0,46 *	-0,14	-0,41 *	-0,29	0,05	0,01	-0,01
K						1,00	0,06	0,30	0,00	-0,31	-0,13	0,17	0,21	0,09
Mg							1,00	0,06	0,08	0,09	-0,06	0,05	0,13	0,17
S								1,00	0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	-0,06
Na									1,00	0,18	0,51 **	0,50 **	-0,01	0,15
Fe										1,00	0,37	0,17	-0,11	-0,01
Cu											1,00	0,58 **	-0,08	0,11
Mn												1,00	-0,05	0,14
Zn													1,00	0,70 ***
B														1,00

Nivel de significancia: < 0,0001 "****"; 0,001 "***"; 0,01 "**"; 0,05 ".".

Tabla 33. Componentes (CP) escogidos del análisis de componentes principales (ACP). En el CP 4 de 14 se alcanzó el 62% de la variabilidad de los datos.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Desviación estándar	1,7516	1,5532	1,4120	1,0968
Proporción de varianza	0,2192	0,1723	0,1424	0,0859
Proporción acumulada	0,2192	0,3915	0,5339	0,6198

De los 53 sustratos evaluados, los diez que promovieron una mayor ganancia de masa fresca de raíces (Pf. Raíz), fueron: SC50-VE50 (9,63 g); CA50-PE50 (9,17g); SC50-PP50 (8,83g); VE100 (8,37g); SC25-PE75 (8,23g); CA25-ZE75 (8,20g); SC25-PP75 (8,00g); CP50-PE50 (7,77g); SC50-PE50 (7,63g); CP25-PP75 (7,60g). Por otro lado, los diez sustratos que mostraron el efecto contrario sobre la ganancia de masa fresca de raíces fueron: CA50-EC50 (2,93 g); PP100 (3,30g); CP75-EC-25 (3,30g); CA50-ZE50 (3,40g); CP25-ZE75 (4,07g); CA25-PP75 (4,23g); CA50-PP50 (4,37g); CP50-VE50 (4,47g); CA75-EC25 (4,50g) y CA100 (4,5g) (Tabla 54). Aunque los resultados presentados en la Tabla 54 no mostraron una tendencia clara, que indicara cual combinación de sustratos (orgánico y mineral) en sus diferentes proporciones ejercía una mayor influencia sobre la ganancia de peso fresco de las raíces, en la Tabla 55 se puede evidenciar, que sin tener en cuenta el factor proporción, los mejores sustratos fueron: VE100, SC-PP, SC-PE y SC-VE, seguidos por PE100, CA-PE, SC-EC, SC-ZE.

Cuando se analiza el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, se puede evidenciar que la presencia de SC influencia la ganancia de masa fresca de raíces, pues un número considerable de sus combinaciones con materiales de origen mineral mostraron los mejores resultados (Figura 39). Muchos autores han demostrado las ventajas del uso de SC sobre el crecimiento de plantas sembradas en él (Ansorena, 1994; Farias *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2006; Nieto *et al.*, 2006; Pettit, 2011), lo cual corrobora lo hallado. De igual forma, el SC tiene una alta capacidad de retención de humedad (Tabla 15), que facilita la expansión de raíces y la absorción de nutrientes.

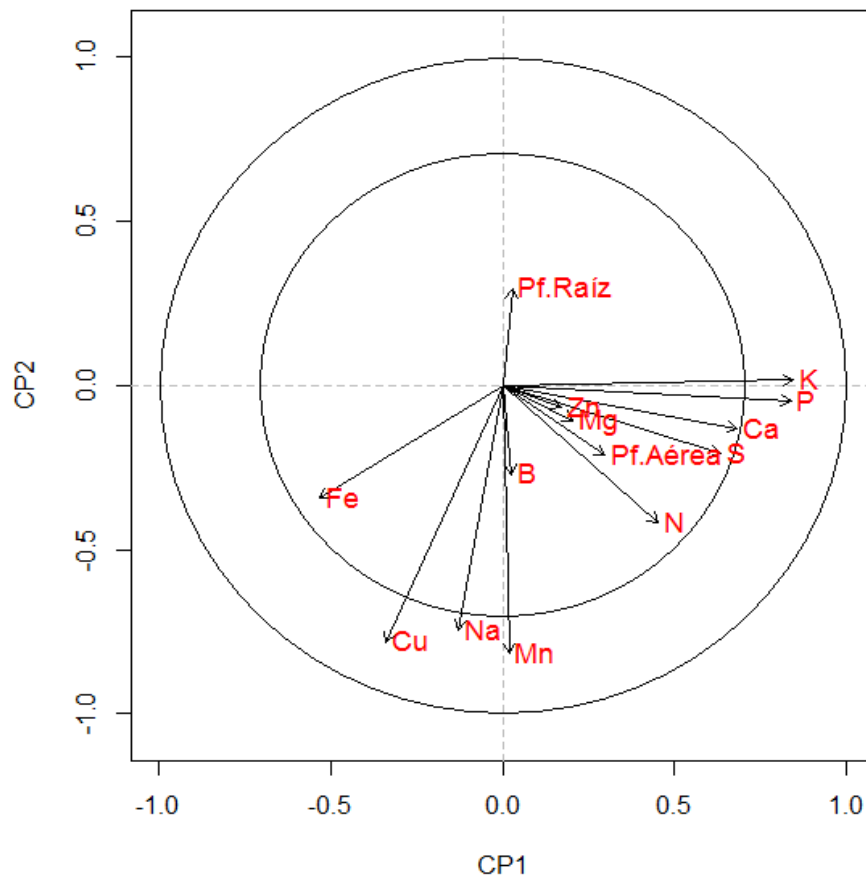


Figura 37. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables estudiadas. Se presenta la combinación de los primeros cuatro componentes principales (CP).

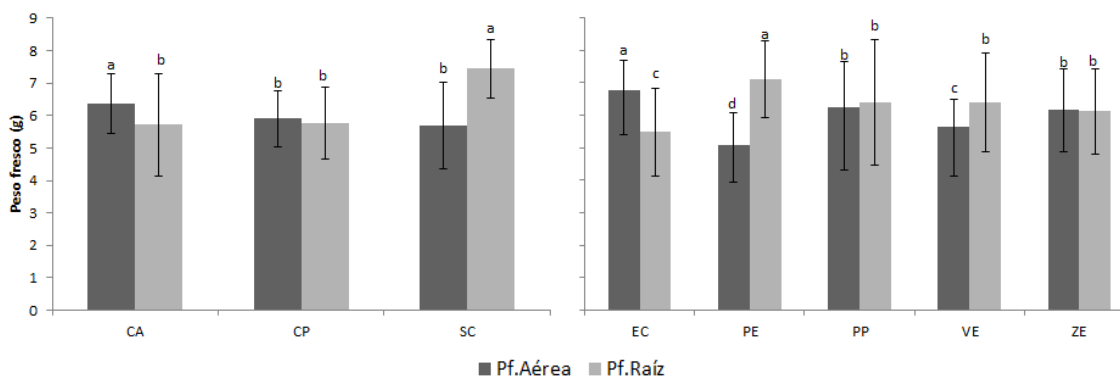


Figura 38. Peso fresco de parte aérea (Pf.Aérea) y de raíz (Pf.Raíz) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

En cuanto a los materiales de origen mineral, en promedio los esquejes sembrados en PE obtuvieron el mayor Pf.Raíz (Figura 38), aunque la tendencia no es tan clara como el SC, ya que materiales como VE y PP también influenciaron positivamente esta variable

(Figura 38). Esto se corrobora con la concentración de elementos mayores de la PE (Figura 40).

Es conveniente prestarle atención al hecho de que, en cuanto a generación y crecimiento de raíces, las plantas sembradas en cascarilla de palma (CP) no presentaron diferencias significativas con aquellas que crecieron en CA (Figura 38), lo que puede estar direccionando a la CP como un material muy promisorio.

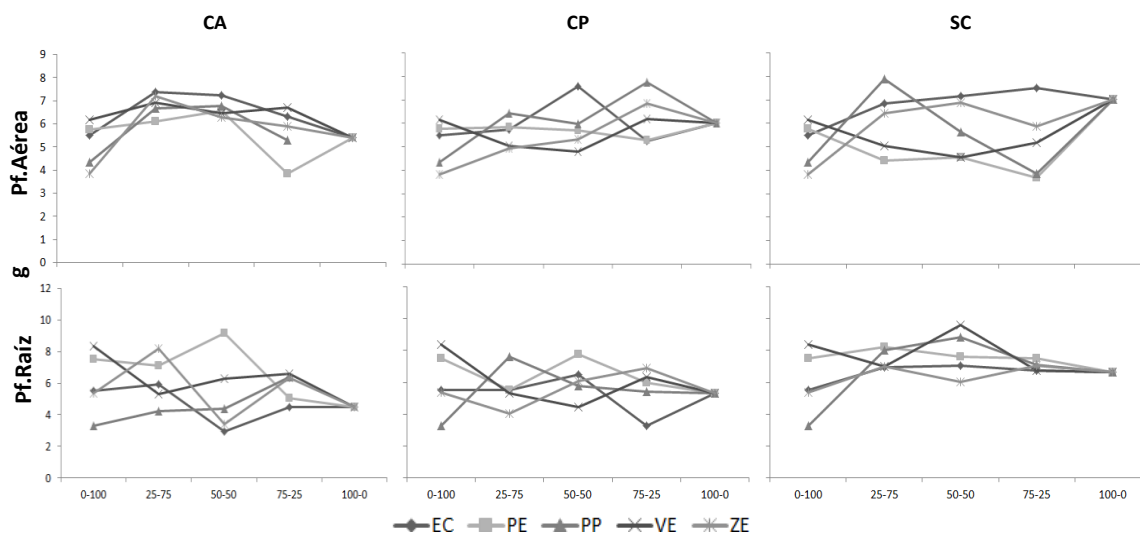


Figura 39. Peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y peso fresco de raíz (Pf. Raíz) de las pantas sembradas en CA, CP y SC mezclada en diferentes proporciones con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

5.2.2 Concentración de elementos mayores en tejido vegetal

Las variables Pf. Aérea y Pf. Raíz presentan correlaciones muy débiles con la concentración de nutrientes en el tejido vegetal (Tabla 32). Con estos resultados no se podría afirmar que el crecimiento de los brotes de los esquejes de clavel se debe o está influenciado por la concentración de algún nutriente en particular. Sin embargo, el N presentó una correlación significativa de forma positiva con el S (0,49) y Ca (0,48). White (2012) afirma, que el S presenta sinergismo con el ion NH_4^+ , lo que facilita su movilización dentro de la planta. El N presenta sinergismo con el Ca, pues la absorción de uno de ellos potencializa la absorción del otro, ya que según White (2012), el Ca se moviliza dentro de la planta acompañado del ion NO_3^- . La correlación entre el P y el Ca es positiva, lo cual no refleja el antagonismo reportado entre estos dos elementos, por la formación de complejos entre el P y el Ca que precipitan, provocando su inmovilización en la raíz (Neuman y Römheld, 2012), en este caso pareciera como si se comportaran de forma sinérgica. No obstante, aunque en el tejido vegetal los nutrientes estén inmóviles, por ejemplo, en forma de oxalato de Ca en las paredes celulares (Hawkesford *et al.*, 2012), el método de determinación del elemento permite cuantificar su concentración independientemente de su estado de movilidad dentro de la planta. El K también presenta una correlación significativa con el Ca, aunque estos dos iones presentan antagonismo debido a su competencia por los sitios de cambio generados por los grupos

carboxilo (COOH⁻) en las paredes celulares. En este caso, el hecho de que el Ca inmóvil también se pueda medir, implica que su concentración se correlacione con la del K.

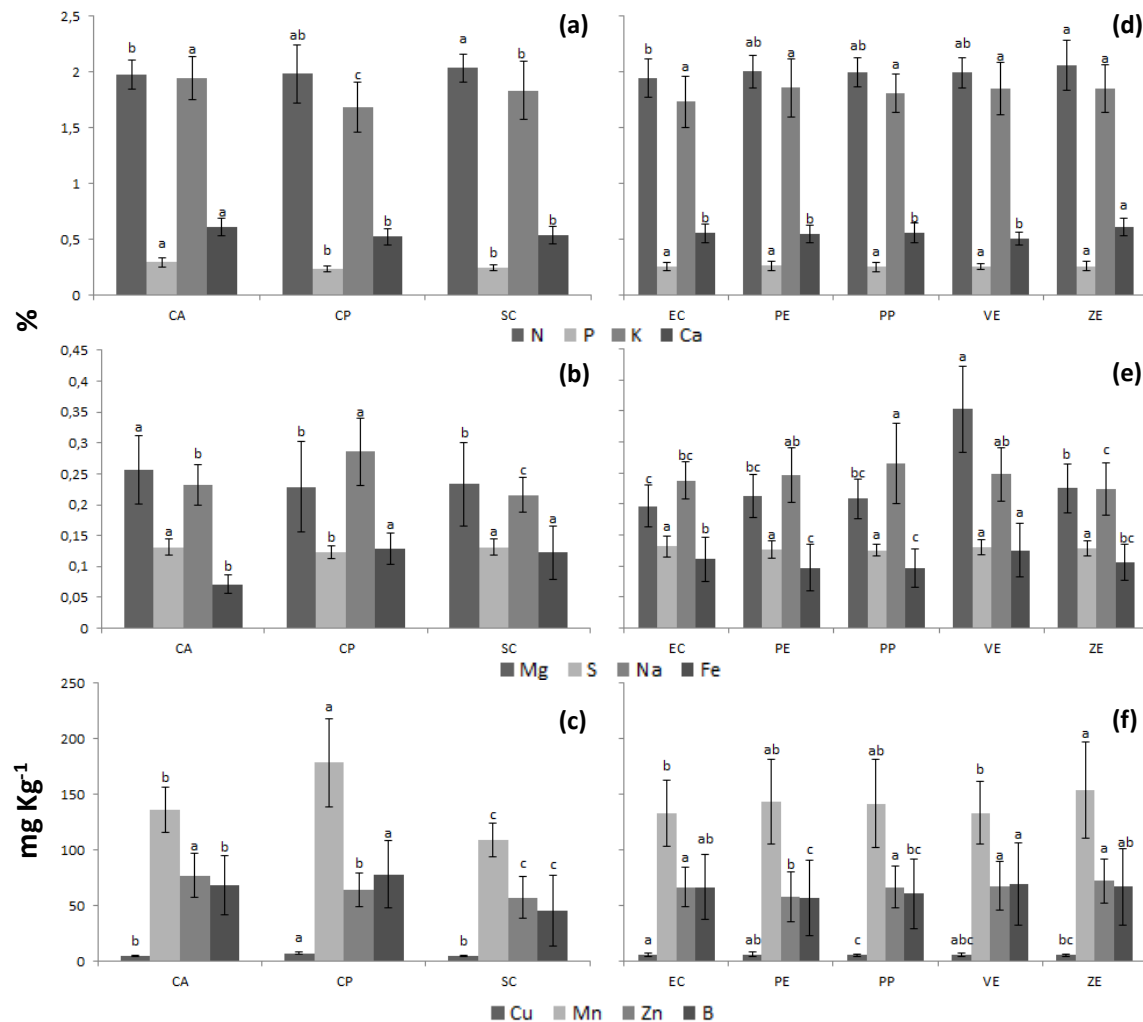


Figura 40. Concentración de N, P, K, Ca, (a y d); Mg, S, Na y Fe (b y e) y Cu, Mn, Zn y B (c y f) de los materiales de origen orgánico y mineral evaluados. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$); $n=15$.

Al igual que en la matriz de correlación, tan solo se evidencian correlaciones aisladas y puntuales entre el K y el P en la combinación CP1–CP2 (Figura 37). Lo más notable del ACP es que el Pf.Raíz no tiene cercanía ni correlación evidente con la concentración de ningún nutriente, lo que indica que la generación y crecimiento de las raíces de esquejes de clavel en etapa de vivero no depende de la disponibilidad ni absorción de un nutriente en particular, se debe más a la acción conjunta de todos los elementos esenciales. Cabe recordar, que en esta etapa no se realiza aporte de nutrientes mediante fertilización, que pueda estimular la absorción de uno o varios nutrientes sobre los demás.

Como ya se mencionó anteriormente, de los materiales de origen orgánico, el sustrato de coco (SC) generó el mayor crecimiento de raíces (Figura 38), este efecto se atribuye a la

óptima absorción de elementos mayores y secundarios (N, P, K, Ca, Mg y S) (Figura 40), ya que las plantas que crecieron en mezclas con SC presentaron la mayor concentración de N, y tuvieron un rango medio de absorción de P, K, Ca y Mg, lo que pudo incidir en la mayor generación de raíces (Figura 40). No obstante, cabe aclarar que el hecho de que se presente la mayor concentración de uno o un grupo de nutrientes en el tejido vegetal, no indica que el estado nutricional de la planta sea el óptimo, pues existen interacciones, antagonismos y sinergismos entre nutrientes, que podrían ejercer un efecto positivo o negativo en el desarrollo de la planta (Tabla 29). Si se comparan los niveles óptimos en tejido vegetal para plantas de clavel presentados en la Tabla 28, con los del sustrato SC50-VE50, que obtuvo el mayor Pf.Raíz, de los elementos mayores y secundarios, tan solo el P (0,25%) se encuentra dentro del rango adecuado (0,2 a 0,35%).

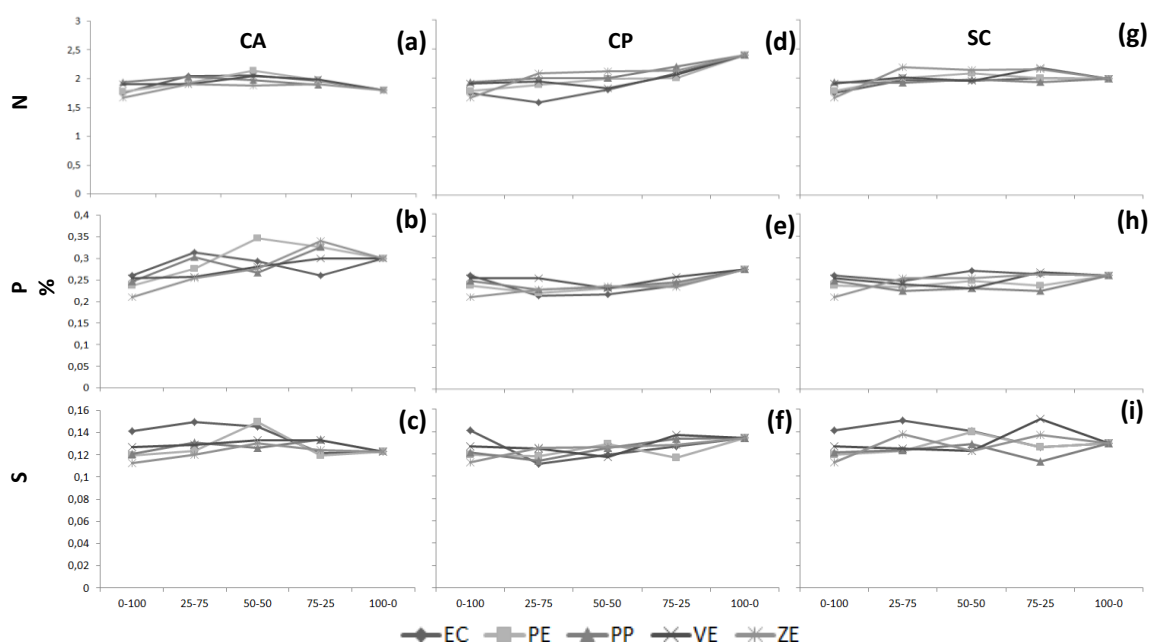


Figura 41. Concentración de N, P y S del tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

La PE presentó una de las mayores acumulaciones de Na en tejido vegetal, lo que pudo influir sobre la baja acumulación de Mg y media acumulación de Ca, comparado con los demás materiales de origen mineral (Figura 40).

Aunque se evidencia que a medida que aumenta el contenido de CP en el sustrato, también lo hace la concentración de N en el tejido vegetal (Figura 41) y que los esquejes propagados en los sustratos CP100, CP75-PP25 y SC25-EC75 contienen la mayor concentración de N (Tabla 56), estos no corresponden con los de mayor Pf.Raíz (Tabla 54), aun cuando es bastante aceptado que el crecimiento vegetativo, así como la producción de raíces de la mayoría de las especies de plantas está influenciado notablemente por el aporte de N.

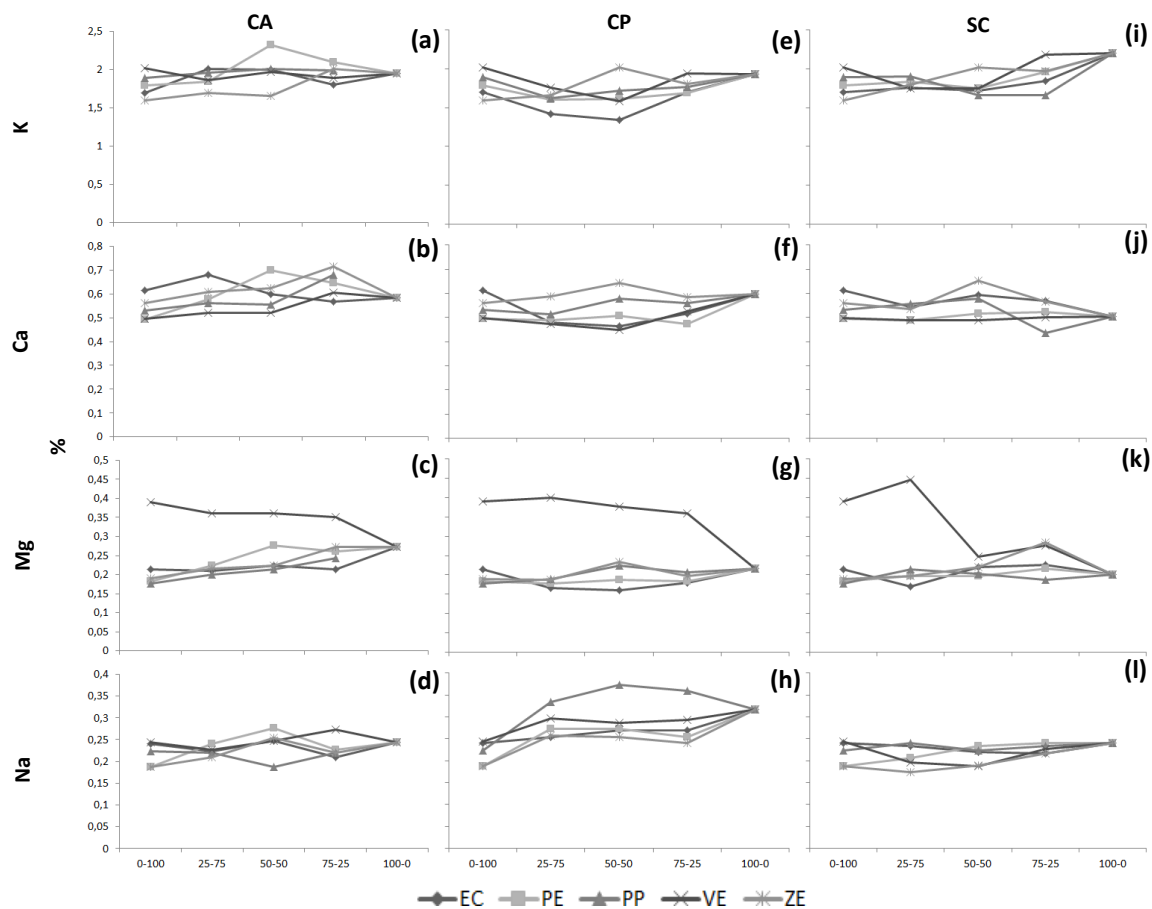


Figura 42. Concentración de cationes intercambiables en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

Cuando se compara la variable Pf.Raíz con la concentración de nutrientes a partir de los sustratos sin tener en cuenta el factor proporción (Tabla 57), se puede evidenciar, que aunque los sustratos con mayor Pf.Raíz (Tabla 55) no son al mismo tiempo los que contienen exactamente la mayor concentración de nutrientes, estos sustratos si se encuentran en las posiciones superiores de la prueba de comparación de Tuckey¹⁶ para los nutrientes N, P, K, Ca y Mg, es decir, si se encuentran dentro de los que mayor concentración de estos nutrientes tiene en tejido vegetal. Esto se puede vislumbrar con mayor facilidad en los sustratos sin tener en cuenta la proporción (Tabla 57), que en aquellos con el factor proporción incluido en la prueba de comparación (Tabla 56). Por tal

¹⁶ En la prueba de comparación de Tuckey, los valores más altos se asocian con las primeras letras del alfabeto y a sus combinaciones, por ejemplo "a", "ab", "abc", "bc", etc. Entre más alejados estén de estas letras, menor será el valor de la variable estudiada. También cabe recordar, que valores con la misma letra no presentan diferencias significativas al alfa establecido previamente.

razón, se puede inferir que el origen de los materiales incluidos en el sustrato tiene una mayor influencia sobre el desarrollo de las plantas, que su proporción en la mezcla.

Al analizar el comportamiento de las mezclas ante el aumento o disminución de la proporción de su componente orgánico, de los cationes intercambiables, sobresale la alta concentración de Mg en el tejido vegetal de las plantas que crecieron en sustratos con VE combinado con los tres sustratos de origen orgánico (Figura 42-c, g y k), lo cual concuerda con la alta concentración de este catión tanto en la fase intercambiable (Tabla 36), como en la fase soluble de la VE (Tabla 38). De igual forma, las plantas que crecieron en sustratos que contienen una alta proporción de SC dentro de la mezcla (> 75%) presentan un alto porcentaje de K (Figura 42-a, e y i), que concuerda con la alta concentración de este catión en su fase intercambiable (Tabla 44). Sin embargo, aunque de los sustratos de origen orgánico la CA contiene la mayor concentración de K, tanto en fase intercambiable (Tabla 44) como en fase soluble (Tabla 40), este sustrato no generó la mayor absorción de este catión por parte de las plantas, lo cual se explica por los antagonismos que se pueden presentar entre cationes.

En cuanto a las relaciones iónicas en el tejido vegetal, se puede observar en la Tabla 34 que los sustratos que generaron el mayor Pf.Raíz presentaron una adecuada relación N/P, N/S y N/K. Es de resaltar, que todos los sustratos mostrados en la Tabla 34 presentaron los desbalances catiónicos (inferior al rango óptimo) K/Na, Ca/Mg y Ca/Na, y debido a que la relación catiónica Ca/K se encontraba dentro del rango adecuado, se evidencia un exceso de absorción de Na, y Mg.

5.2.3 Concentración de elementos menores en tejido vegetal

La concentración de elementos menores presenta una correlación muy débil, generalmente negativa, con la ganancia de peso fresco de raíces (Tabla 32). Sin embargo, el Fe presenta una correlación significativa de forma negativa con el P (-0,45), el Ca (-0,41) y el K (-0,31), lo que indica que este micronutriente está limitando la absorción de P y Ca o viceversa, el P y el Ca están limitando la absorción de Fe. Cabe resaltar, que el P puede formar complejos con el Fe, que se precipitan, limitando así su absorción por parte de las raíces de las plantas (Sposito, 2008). De igual forma, cuando el Fe está en una concentración muy alta, tanto en la solución como en el complejo de cambio, compite con iones como el Ca y el K por espacio en los canales y transportadores de las membranas celulares de las raíces de la planta, algunos de baja selectividad (Marschner, 2012).

Cuando se comparan los niveles óptimos en tejido vegetal para plantas de clavel presentados en la Tabla 28 con los del sustrato SC50-VE50, que obtuvo el mayor Pf.Raíz, de los elementos menores, el Mn y el Zn (103 y 41 mg Kg⁻¹, respectivamente) se encuentran dentro de este rango.

No es tan clara la influencia de un sustrato en particular sobre la absorción de micronutrientes por las plantas (Figura 43). Tan solo se evidencia una tendencia que muestra que aquellas plantas que crecen en sustratos con CP tienden a absorber más Cu a medida que la proporción de este material aumenta (Figura 43-e) en el sustrato. De

los materiales de origen mineral, la vermiculita (VE) y la zeolita (ZE) fueron los que más concentraron micronutrientes en el tejido vegetal (Figura 40).

Tabla 34. Relaciones elementales en tejido vegetal de las tres mezclas que produjeron esquejes con mayor y menor Pf.Raíz, comparado con las relaciones adecuadas definidas por Medina (2006) y el sustrato testigo utilizado comercialmente (CA100). Datos presentados en mg Kg⁻¹.

Relación	Adecuado	TESTIGO	Mayor Pf.Raíz				Menor Pf.Raíz		
		CA100	SC50-VE50	CA50-PE50	SC50-PP50	CA50-ZE50	CP75-EC25	CA50-EC50	
N/P	7 – 13	6,0	8,5	7,3	8,6	7,0	9,2	6,8	
N/S	7 – 15	14,6	15,3	15,3	15,3	14,4	16,4	14,2	
N/K	0,7 - 1,4	0,9	1,2	1,0	1,2	1,0	1,2	1,1	
N/Cu	3400 - 4600	4822	4231	3929	4507	3593	3158	3958	
P/S	0,7 - 1,8	2,4	1,8	2,1	1,8	2,0	1,8	2,1	
P/Zn	18 - 52	57,2	60,1	60,3	42,7	36,1	38,0	33,3	
K/Mg	6 - 12	7,1	8,9	5,5	8,2	9,0	9,2	7,4	
K/Na	10 - 60	8,0	7,5	8,0	7,4	8,1	7,5	6,6	
Ca/K	0,2 - 0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
Ca/Mg	3,5 - 5,8	2,1	2,6	1,4	2,8	2,7	3,0	2,8	
Ca/Mn	50 - 180	23,4	50,2	30,0	56,2	34,1	47,9	36,4	
Ca/B	210 - 590	109,3	218,0	211,6	241,0	66,9	74,6	90,1	
Ca/Na	4 - 30	2,4	2,2	2,1	2,6	2,4	2,4	2,5	
Mg/Mn	10 - 45	11,0	19,1	20,8	19,8	12,7	16,1	13,0	
Fe/Mn	0,5 - 1,5	2,4	11,7	5,2	10,7	5,9	11,2	4,5	
Fe/Cu	0,5 - 2,6	160,7	243,3	173,1	250,0	180,2	202,0	160,8	
Fe/Zn	9 - 25	11,4	29,2	19,4	20,4	12,7	22,2	9,2	

Cuando se analizan los resultados de los sustratos sin tener en cuenta la proporción (Tabla 59), se evidencia que al igual que como sucedió con el N, P, K, Ca y Mg; el Fe y en menor nivel el Zn, podrían influir positivamente sobre el crecimiento de los esquejes de clavel, debido a que si se comparan los resultados de la Tabla 55 con los de la Tabla 59, se aprecia que cuando la variable Pf.Raíz está en las primeras posiciones de la prueba de comparación de Tuckey, estos dos microelementos se encuentran en las posiciones superiores (no exactamente las primeras) de la misma prueba.

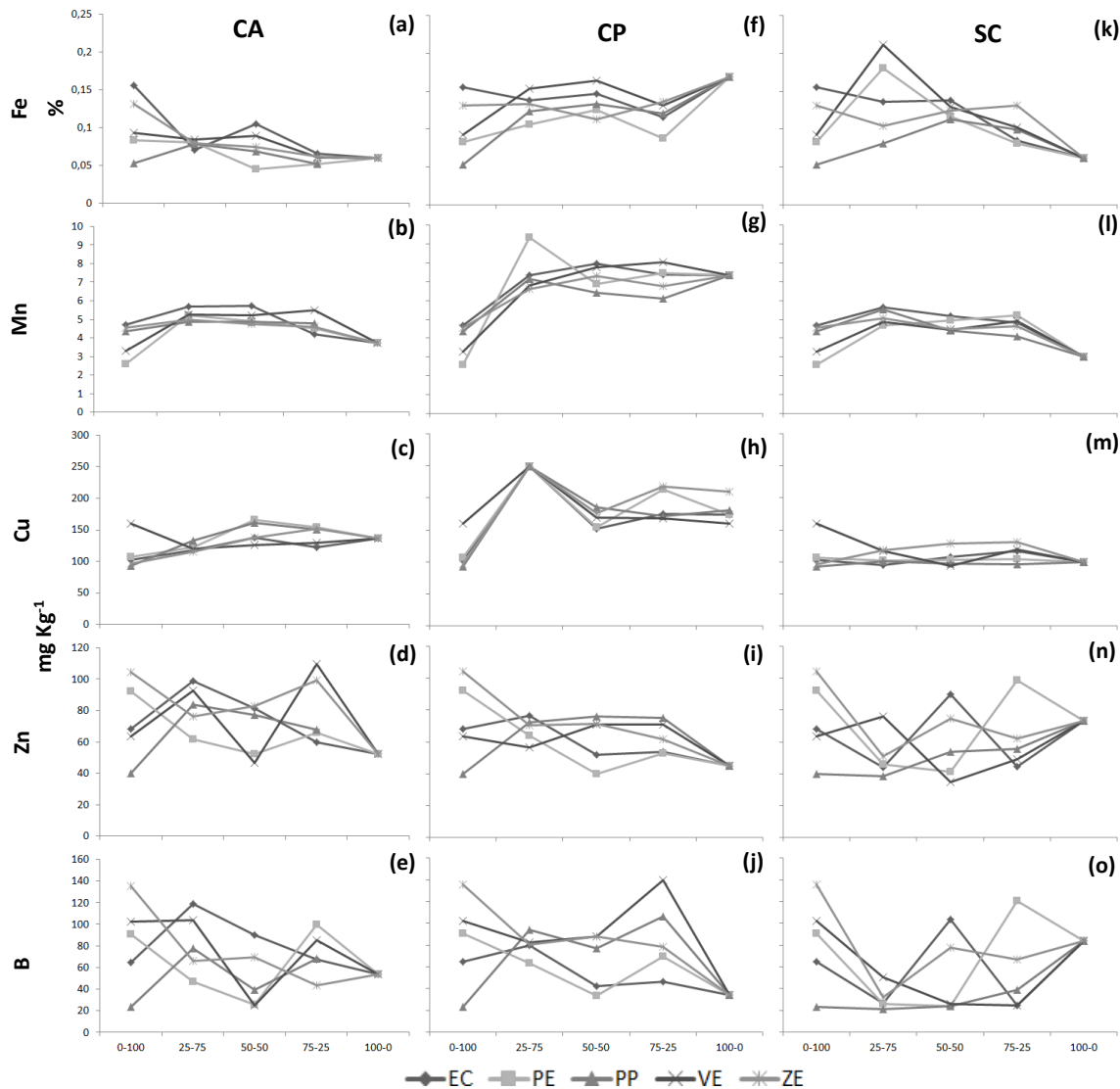


Figura 43. Concentración de Fe, Cu, Mn, Zn y B en el tejido vegetal de las plantas sembradas en CA, CP y SC mezclados con los materiales de origen mineral, a medida que disminuye su proporción en la mezcla; n=3.

En cuanto a las relaciones iónicas, se presentaron desbalances en la relación Fe/Mn y Fe/Cu (superior al rango adecuado) para todos los sustratos (Tabla 34). Esto indica un exceso en la absorción de Fe, que se corrobora con los datos presentados en la Tabla 58¹⁷, comparados con los datos de la Tabla 28. Al mismo tiempo, los mejores sustratos mostraron una adecuada relación Ca/B, que no sucedió con ninguno de los sustratos que generaron el menor Pf.Raíz ni el testigo. Esto podría dar un indicio de que una correcta relación Ca/B puede influenciar positivamente la ganancia en peso fresco de raíces. Al

¹⁷ Se debe tener en cuenta que los nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S y Fe se muestran en %, y para estimar los balances iónicos se transformaron a mg Kg⁻¹.

respecto, Fernández *et al.* (2006), mencionan que la productividad de clavel se incrementa con niveles adecuados de calcio y boro.

5.3 Conclusiones

De los materiales de origen orgánico evaluados, el sustrato de coco presentó los mejores resultados en cuanto a acumulación de masa fresca de raíces, lo que sigue corroborando que este sustrato tiene potencial para la producción de plantas en sistemas de cultivo sin suelo.

Aunque la acumulación de peso fresco de raíces en esquejes sembrados en vermiculita fue estadísticamente más alta, cuando se evalúa su comportamiento en todas las proporciones, no se presentó una tendencia que pudiera definir a este material como el mejor de todos los de origen mineral que se evaluaron, ya que la perlita y la piedra pómez, en algunas proporciones, también mostraron muy buenos resultados.

La cascarilla de palma no mostró diferencias significativas con la cascarilla de arroz en cuanto a ganancia de masa fresca de raíces, por lo que este material se muestra como promisorio para su uso como medio de cultivo en sistemas sin suelo. Se recomienda realizar más investigaciones con cascarilla de palma, que permitan evaluar su comportamiento con diversos cultivos, preferiblemente con un ciclo de producción más amplio.

No se aprecia una influencia clara de los sustratos evaluados sobre la concentración de nutrientes en tejido vegetal, tan solo la vermiculita mostró un efecto notable sobre la absorción de magnesio. No obstante, en promedio todos los nutrientes presentaron una menor concentración, comparado con su nivel antes de la siembra. Sería recomendable hacer un pequeño aporte de nutrientes durante el periodo de enraizamiento, ya que la concentración de nutrientes en los esquejes de clavel al finalizar este ciclo se encontraba por fuera del rango normal, lo que supone un esfuerzo adicional de la planta para alcanzar los niveles adecuados cuando sea trasplantada en campo.

Los sustratos que generaron un mayor peso fresco de raíces mostraron adecuadas relaciones elementales N/P, N/S, N/K, Ca/K, Ca/B y Mg/Mn. Lo que puede indicar, que más que la concentración de nutrientes en el tejido vegetal, es la proporción de los elementos la que puede influenciar positivamente la generación de raíces durante el periodo de propagación de esquejes de clavel.

Se podría inferir, que el origen de los materiales incluidos en el sustrato tendría un mayor efecto sobre el crecimiento de las plantas, que su proporción en la mezcla. Esto debido, a que se pueden encontrar relaciones más claras entre las variables estudiadas, cuando se comparan los sustratos sin tener en cuenta el factor proporción.

Conclusiones y recomendaciones generales

Conclusiones

De 21 materiales identificados inicialmente, se seleccionaron cinco de origen mineral (escoria de carbón, perlita, piedra pómez, vermiculita y zeolita) y tres de origen orgánico (cascarilla de palma, cascarilla de arroz y sustrato de coco), cuyas propiedades los hacen promisorios para ser implementados en sistemas de cultivo sin suelo en Colombia, ya sea para vivero o producción en campo. Su viabilidad agronómica se evaluó a través de la propagación de esquejes de clavel.

En todos los materiales escogidos y sus mezclas hubo enraizamiento de los esquejes. Sin embargo, en cuanto al desarrollo de la planta, definida en términos de acumulación de masa fresca de raíces, el sustrato de coco presentó los mejores resultados. El aumento del contenido de sustrato de coco en la mezcla, correspondió con un aumento en el peso de las raíces. En los sustratos minerales, la vermiculita mostró una tendencia a generar mayor masa fresca de raíces. La perlita y la piedra pómez, en algunas proporciones, también mostraron muy buenos resultados.

La cascarilla de palma resulta promisoriosa por sus características químicas, físicas, de estabilidad, microbiológicas, amplia disponibilidad y bajo costo, además no se presentaron diferencias significativas en la ganancia de masa fresca de raíces con respecto a la cascarilla de arroz quemada, que es el sustrato de referencia.

Con excepción de la vermiculita, que influyó sobre la absorción de magnesio, los demás sustratos no influenciaron claramente la concentración de nutrientes en el tejido vegetal. Esta concentración fue mayor en el esqueje al inicio, y disminuyó al final del proceso de enraizamiento. Sería recomendable hacer un pequeño aporte de nutrientes durante el periodo de enraizamiento, ya que la concentración de nutrientes en los esquejes de clavel al finalizar este ciclo se encontraba por fuera del rango normal, lo que supone un esfuerzo adicional de la planta para alcanzar los niveles adecuados cuando sea trasplantada en campo.

No hubo evidencia que la concentración de un nutriente en particular influyera sobre el proceso de enraizamiento, pero fue evidente la influencia del balance de nutrientes en el proceso. Los sustratos que generaron un mayor peso fresco de raíces mostraron adecuadas relaciones N/P, N/S, N/K, Ca/K, Ca/B y Mg/Mn, lo que resalta la importancia del balance de nutrientes en el enraizamiento de los esquejes de clavel.

A lo largo del estudio, se aprecia una tendencia a la disminución de la concentración de iones en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, que obedece a procesos de absorción desde la fase soluble a las raíces de las plantas y desorción desde las superficies cargadas a la solución del sustrato.

Independiente del sustrato, la concentración de iones en los lixiviados mostró una tendencia a disminuir, alcanzando una concentración estable al final del estudio. A

medida que avanza el proceso de enraizamiento, aumenta la absorción de nutrientes por la planta, agotando los nutrientes que están en la fase soluble e intercambiable de los sustratos, ya que el sistema no recibió fertilización, por consiguiente, la concentración de iones disminuye en la fase soluble de los sustratos y esto genera una disminución de la cantidad de iones descargada en los lixiviados.

La concentración de nitratos en la fase soluble de los sustratos no sobrepasó los límites permitidos, lo que indica que estos materiales no liberaron nitratos en cantidades que pudieran ser nocivas para el ambiente.

Recomendaciones

Aunque los materiales provenientes del cultivo de palma se muestran como promisorios, es necesario ampliar las investigaciones de su uso en campo, pues no se conoce claramente como responderían las plantas tanto de ciclo corto, como de ciclo largo si crecieran en estos medios de cultivo.

Dada la importancia de la estabilidad de los materiales, se recomienda evaluar en futuros trabajos si aquellos de origen orgánico con altos contenidos de lignina, como la cascarilla de palma, pueden equiparar la resistencia a la degradación que posee la cascarilla de arroz, atribuida a sus altos contenidos de óxido de silicio. De igual forma, es conveniente tener en cuenta la durabilidad de los materiales, puesto que aunque algunos de naturaleza mineral como la zeolita son costosos, pero resistentes a la alteración, pueden ser reutilizados durante mucho más tiempo, reduciendo los costos a largo plazo.

Para establecer si hay aumentos en la lixiviación de nitratos, es necesario evaluar el comportamiento de los lixiviados en sistemas productivos comerciales, en los cuales se aplican fertilizantes.

Se recomienda tener en cuenta la granulometría de los materiales, ya que este parámetro afecta las características de los sustratos al definir la cantidad y tamaño de poros, la retención de agua y la densidad del material.

El conocimiento de las características de los materiales individuales podría predecir las características de la mezcla final, pues las propiedades químicas que sobresalen en un material, aumentan a medida que él contenido de dicho material se incrementa en la mezcla. De esta forma, se pueden fabricar sustratos con las características químicas deseadas, si se conocen las propiedades y composición química de los materiales que lo compondrán.

Literatura citada

- Abad, B., Noguera, M y Carrión, B. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía (Ed.). Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3 edición. Ediciones mundi prensa, p: 299-354.
- Abad, M. y Noguera, M. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía, L. (Ed.). Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales, 2ª Ed. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 290- 339p.
- Abad, M., Martínez, F., Martínez, D. y Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. Actas de Horticultura. 11: 141- 154.
- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urreztarazu, M. (Ed.). Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi- prensa. Madrid. P:113- 158.
- Abad, M., Noguera, P., Bures, S. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. Bioresour. Technol. 77, 197–200.
- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., Noguera, V. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. Bioresource technology. Vol 82, P: 241-245.
- Agronet. 2015. Estadísticas agropecuarias Arroz de riego. <http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/ReportesAjax/VerReporte.aspx>. Febrero 2015.
- Ansorena, M. 1994. Sustratos: Propiedades y Caracterización. Mundi Prensa. Madrid, España. 105, 172 p.
- Apaolaza, L. y Guerrero, F. 2008. Comparison between pine bark and coconut husk sorption capacity of metals and nitrate when mixed sewage sludge. Bioresour Technol. 99(6): 1544- 1548.
- Apaolaza, L., Gascó, A., Gascó, J. y Guerrero, F. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. Biosource Technology. 96: 125- 131.
- Asiah, A., Mohd, R., Mohd, K., Marziahj, M., Shaharuddin, M. 2004. Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust and Oil Palm Empty Fruit Bunch and the Growth of Hybrid Heat Tolerant Cauliflower Plant. PertanikaJ. Trap. Agric. Sci, 27(2), 121–133.
- Asocolflores. 2013. Informe de gestión Asocolflores 2013. Capítulo Ceniflores.
- Barber, S.A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach (2nd edn). New York: Wiley.
- Bar-Yosef, B. 1996. Root excretion and their environmental effects: Influence on availability of phosphorus. En Plant Roots, The Hidden Half, 2nd edn (Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, eds). New York: Marcel Dekker, pp. 581–605.
- Bar-Yosef, B. 1996. Root excretion and their environmental effects: Influence on availability of phosphorus. En Plant Roots, The Hidden Half, 2nd edn (Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, eds). New York: Marcel Dekker, pp. 581–605.
- Benton, J. 2005. Hydroponics – A practical guide for the soilless grower. Second edition. CRC Press. USA. p. 15-17.

- Benton, J. 2005. *Hydroponics – A practical guide for the soilless grower*. Second edition. CRC Press. USA. p. 15-17
- Biauxuli, C., Aguilar, J. 2002. *Cultivo sin suelo de hortalizas – Aspectos prácticos y experiencias*. Valencia, España. Generalitat valenciana
- Block, C., C. de Krejff, R. Baas y G. Wever. 2008. *Analytical methods in soilless cultivation in Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 245 - 289
- Boodt, M., Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*. 37: 2054- 2062.
- Botero, A., Flórez, V. 2006. Cambios en la composición química de los sustratos en el cultivo de clavel. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 217-234
- Botero, A., Flórez, V. 2006. Cambios en la composición química de los sustratos en el cultivo de clavel. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 217-234
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Feng Ma, J., Rengel, Z. y Zhao, F. 2012. Beneficial elements. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 249 - 270
- Brown, E. y Pokorny, F. 1975. Physical and chemical properties of media composed of milled pine bark and sand. *J. Amer. Soc. Hortic. Sci.*, 100, 119–121.
- Cadahía, L. 2005. *Fertirrigación. Aspectos básicos – Fertirrigación de cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. 3ª edición. España. Mundi prensa. P 79-89
- Cárdenas, C., Rivera, I., Flórez, V., Piedrahita, W., Chávez, B. 2006. Análisis de crecimiento en clavel estándar variedad Nelson cultivado en sustratos. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 111 - 128
- Castaldi, P., y Melis, P. 2004. Growth and Yield Characteristics and Heavy Metal Content on Tomatoes Grown in Different Growing Media. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35:1-2, 85-98. <http://doi.org/10.1081/CSS-120027636>
- Chaparro, L., A. Farias., B. Chaves., D. Miranda y V. Flórez. 2006. Análisis de crecimiento en rosa variedad Charlotte en los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo - En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 77-90
- Charlo, H., Ferreira, A., Vargas, P., Castoldi, R., Melo, D., y Braz, L. 2012. Alterations in Levels of NPK, Electrical Conductivity and pH of Substrate, in Cultivation of Peppers. *Xxviii International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (Ihc2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation*, 927 (FEBRUARY 2012), 437–442. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.54>
- Chavez, W., Di Benedetto, A., Civeira, G., y Lavado, R. 2008. Alternative soilless media for growing *Petunia x hybrida* and *Impatiens wallerana*: Physical behavior, effect of fertilization and nitrate losses. *Bioresource Technology*, 99(17), 8082–8087. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.063>
- Conover, C. 1967. Soil amendments for pot and field grown Flowers. *Florida Flower Grower*. 4(4): 1- 4.
- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, M., Robles, A., Juárez, P. 2013. Sustratos en la horticultura. Mexico. *Revista Biociencias*. P 17-26
- Daniels, R. y Hammer, R. 1992. *Soil Geomorphology*. John Wiley & Sons. Inc. U.S.A.

- Daniels, W. y Wright, R. 1988. Cation exchange properties of pine bark growing media as influenced by pH, particle size, and cation species. *J Amer. Soc. Hort. Sci.*, 113, 557–560.
- De Boodt, M., Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in floriculture. *Acta Horticulturae*. 26: 37- 44.
- De Farias, W., Oliveira, L., Oliveira, T. Dantas, L. y Silva, T. 2012. Caracterizacáo física de substratos alternativos para producao de mudas. *Agropecuária Científica No Semiarido*. 8(3): 1-6.
- Dogan, M y Alkan, M. 2004. Some physiochemical properties of perlite as an adsorbent. *Fresenius Environ. Bull.*, 13, 252–257.
- Evans, M., Konduru, S. y Stamps, R. 1996. Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *Hort Science*. 31(6): 965- 967.
- Farias, A., L. Chaparro., A. Campos., B. Chavez y V. Flórez. 2006. Curvas de crecimiento de rosa en sistemas de cultivo sin suelo en la sabana de Bogotá - En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P. 91 – 110.
- Fernández, A., Flórez, V.J y Chaves, B. 2006. Niveles foliares de nutrientes en clavel variedad “Nelson” y su relación con la producción. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P: 237-247
- Fernández, M. 2010. Evaluación de sustrato de fibra de madera de pino frente a sustratos convencionales en cultivo hidropónico de tomate. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Técnico Agrícola en explotaciones agropecuarias. Nafarroako Unibersitate Publikoa. Pamplona.
- Filzmoser, P y Gschwandtner, M. 2015. Mvoutlier: Multivariate outlier detection based on robust methods. R package version 2.0.6. <https://CRAN.R-project.org/package=mvoutlier>
- Flórez, V., Miranda, D., Chavez, B., Chaparro, L., Cárdenas, C., Fariás, A. 2006. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo sin suelo. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 43-52.
- Forero, A; Escobar, H; Medina, A y Monsalve, O. 2010. Uso de materiales orgánicos en el manejo del suelo en cultivos de hortalizas. Universidad Jorge Tadeo Lozano - Centro de Biosistemas.
- Fornes, F; Belda, R. 2014. Aprovechamiento de residuos orgánicos como componentes de sustrato de cultivo. En: Máster en Gestión, Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos (UV). Alfa Delta Digital S.L. Valencia.
- Gallegos, D. 2008. Volumen óptimo de piedra pómez y tezontle como sustratos para la producción de jitomate en hidroponía. Tesis como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agrobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 56p.
- Gerding, V., M. Hermosilla y R. Grez. 1996. Sustratos de corteza compostada para la propagación vegetativa de estacas de tallo de *Podocarpus nubigena* Lindl. y *Eucryphia cordifolia* Cav. *Bosque* 17(2), 57-64.
- Ghehsareh, A.M., Kalbasi, M. 2012. Effect of addition of organic and inorganic combinations to soil on growing property of greenhouse cucumber. *African Journal of Biotechnology* Vol. 11(37), pp. 9102-9107. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>. DOI: 10.5897/AJB11.1750

- Gul, A., Erogul, D. y Ongun, A. 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp- head lettuce. *Scientia Horticulturae*. 106: 464- 471.
- Gul, A., Kidoglu, F. y Anac, D. 2007. Effect of nutrient sources on cucumber production in different substrates. *Scientia Horticulturae*. 113: 216- 220.
- Hall, J. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of experimental botany*. Vol. 53, No 366. P: 1-11
- Harland, J., Lane, S. y Price, D. 1999. Further experiences with recycled zeolite as substrate for the sweet pepper crop. *Acta Hort*. 481: 187- 194.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I, y White, P. 2012. Functions of macronutrients. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 135 - 190
- Henao, M y V. Flórez. 2006. Relación entre la composición química de los lixiviados y el tipo de sustrato en un sistema de producción de rosa y clavel sin suelo. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 265-281
- Henao, M y V. Flórez. 2006. Relación entre la composición química de los lixiviados y el tipo de sustrato en un sistema de producción de rosa y clavel sin suelo. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 265-281
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C. y Jaillard, B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant Soil*, 248, 43–59.
- Huang, M y A. Violante. 1986. Influence of organic acids on crystallization of precipitation products of aluminium. En: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (P.M. Huang y M. Schnitzer, eds). SSSA, Spec. Pub. No. 17. Madison: Soil Science Society of America. p. 159 – 222
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2012. *Viveros de frutales registrados ante el ICA a nivel nacional*.
- Jaramillo, D. 2014. *El suelo: Origen, propiedades, especialidad*. Segunda edición. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias, Escuela de geo ciencias. Medellín Colombia.
- Jenagathan, M. 1992. Nut water analysis as a diagnostic tool in coconut nutrition studies. *Commun Soil Sci. Plant Anal*. 23(17-20): 2667- 2686.
- Johar, N., Ahmad, I., y Dufresne, A. 2012. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 93–99. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.016>
- Kafkafi, U. 2008. Functions of the root systems. En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 13 - 40
- Kampf, A. y Fermino, M. 2000. Selecao de materiais para uso como sustrato. En: *Substratos para plantas: a base da producao vegetal em recipientes*. Porto Alegre: Génesis. 139- 145.
- Kang, J-Y., Lee, H-H. y Kim, K-H. 2004. Physical and Chemical Properties of Inorganic Horticultural Substrates Used in Korea. *Proc. IS on Growing Media Eds.: Alsanius, Jensen & Asp Acta Hort* 644, ISHS 2004.

- Kroeff, J. A. Dutra de Sousa, P. and Kämpf, A. N. 2004. Physical and chemical properties of substrates with an organic origin for growth of potted plants. *Ciencia Rural Santa María* 32(6):937-944.
- Ku, C.S.M., Hershey, D.R. 1997. Growth response, nutrient leaching, and mass balance for potted poinsettia. I. Nitrogen. *J. Amer. Soc. Horti. Sci.* 122, 452– 458.
- Landis, T., R. Tinus., S. McDonald y J. Barnett. 1990. The container tree nursery manual. Handbook 674. Washington, DC. USDA, Forest Service. 85 p.
- Lang, H.J., Pannuk, T.R. 1998. Effects of fertilizer concentration and minimum-leach drip irrigation on the growth of New Guinea Impatiens. *HortScience* 33, 83–688.
- Lavado R. 2000. Aguas y sustratos para la producción ornamental. Origen, propiedades, manejo, influencia sobre los cultivos y determinaciones. Buenos Aires, Argentina. *New Plant.* 109 p.
- Lieth, H y Oki, L. 2008. Irrigation in soilless production. En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice.* Elsevier. USA. P: 117:156
- Liu, L. 2015. Desarrollo de nuevos sustratos a base de compost y biochar para la propagación y producción de *Rosmarinus officinalis* L. en vivero profesional. Tesis de pregrado. Escuela técnica superior de ingeniería agronómica y del medio natural. Universidad Politécnica de Valencia.
- Lu, H., Ye, Z., Zhang, X., Lin, X., y Ni, W. 2011. Growth and yield responses of crops and macronutrient balance influenced by commercial organic manure used as a partial substitute for chemical fertilizers in an intensive vegetable cropping system. *Physics and chemistry of the earth.* Vol 36. P: 387-394.
- Marschner, P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier
- Marshall, T., Holmes, J. y Rose, C. 1996. *Soil Physics* (3rd edn). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Martell, A.E. y Smith, R.M. 1989. *Critical Stability Constants.* Vol. 6, New York: Plenum Press.
- Martínez, P.F. y Roca, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo, propiedades y manejo. En: Flórez (ed.). *Sustratos, manejo de clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo.* Unibiblos, Bogotá. P: 37-78
- Medina, A. 2006. Caracterización de sustratos para el cultivo sin suelo. Centro de investigaciones y asesorías agroindustriales. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Medina, A. 2006. Métodos de diagnóstico nutricional para fertirriego utilizados en Colombia. Experiencias y perspectivas. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana.* Bogotá. Unibiblios. P. 191-216
- Medina, A; Escobar, H y Monsalve, O. 2008. Actual stage and perspectives for fertirrigation and organic matter use for greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) production systems in Colombia. *International Symposium on tomato in the tropics.* Book of abstracts. p: 80.
- Mendiburu, F. 2015. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research.* R package version 1.2-3. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.
- Monsalve, O., Escobar, H., Garzón, P. 2009. Caracterización de materiales y mezclas con potencial de uso en la producción de cultivos hortícolas en sustrato. *Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura.* Paipa. Septiembre 2009.

- Monsalve, O., Escobar, H., Garzón, P. 2009. Caracterización de materiales y mezclas con potencial de uso en la producción de cultivos hortícolas en sustrato. Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura. Paipa. Septiembre 2009.
- Monsalve, O., H, Escobar; A, Medina y A, Forero. 2009. Estrategias de fertilización limpia y orgánica en la producción de tomate bajo invernadero. Universidad Jorge Tadeo Lozano - Centro de Investigaciones y asesorías Agroindustriales.
- Monsalve, O; Peña, M e Higuera, C. 2008. Caracterización físico-química de mezclas de sustratos más materiales orgánicos con potencial para ser utilizados en cultivos hidropónicos de tomate (*Solanum lycopersicum*). XIV congreso colombiano de la ciencia del suelo – Manejo del suelo para la mitigación del cambio climático. Libro de resúmenes. P: 57.
- Montes, A., Fuentes, N., Perera, Y., Pérez, O., Castruita, G., García, S., García, M. 2014. Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca^{2+} por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. Superficies y vacío. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C. Vol. 28, núm. 1. P: 5-11
- Moral, R., Gomez, I., Pedreno, J. N., & Mataix, J. 1994. Effects of cadmium on nutrient distribution, yield, and growth of tomato grown in soilless culture. Journal of Plant Nutrition, 17(6), 953–962. <http://doi.org/10.1080/01904169409364780>
- Morel, C. y Hinsinger, P. 1999. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. Plant Soil, 211, 103–110.
- Mumpton, F.A. 1999. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 96, 3463–3471.
- Neuman, Günter, y Römheld, V. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. En: Marschner (Ed). Mineral nutrition of higher plants. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 347 – 368.
- Nieto, D y V. Flórez. 2006. Producción y calidad de rosa y clavel cultivados en cascarilla de arroz y fibra de coco. En: Flórez (ed.). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá. Unibiblios, P: 129 - 143
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. Acta Hort. 517, 279-286.
- Olivo, V. y Baduba, C. 2006. Influencia de seis sustratos en el crecimiento de Pinus ponderosa producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. Bosque. 27(3): 267- 271.
- Orlando, U., Baes, A., Nishijima, W. y Okada, M. 2002. Preparation of agricultural residue anion exchangers and its nitrate maximum adsorption capacity. Chemosphere. 48: 1041- 1046.
- Ortega, R. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. En: Silva Mojica, F (ed.). Fertirrigación. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo, p. 136-137
- Peña, M., Casierra, F. y Monsalve, O. 2009. Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum*) en sustratos acondicionados a partir de materiales inertes y orgánicos. Memorias III Congreso Colombiano de Horticultura. Paipa. Septiembre 2009.
- Peña, M., Casierra, F., Monsalve, O. 2013. Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con materiales minerales y

- orgánicos. Revista colombiana de ciencias hortícolas - Vol. 7 - No. 2 - pp. 217-227, julio-diciembre 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2236>.
- Petitt, I. 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. Universidad Nacional de Colombia.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D y R Core Team. 2016. Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models_. R package version 3.1-124, <URL: <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>>.
- Portal Siembra. 2015. Corpoica. Consolidado de demandas de la agenda de Flores y Follajes – Flores tradicionales. <http://www.siembra.gov.co/siembra/Agenda.aspx>. Febrero 2015.
- Pulido, S y Escobar, H. 2009. Propagación del Tomate en Manual de Producción de tomate bajo invernadero (Escobar, H y Lee, R). Universidad Jorge Tadeo Lozano. Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales. P: 17-20
- Puustjarvi, V. 1977. Peat and its Use in Horticulture. Turveteollisuusliitto Ry, Publ. 3, Helsinki.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R.A. (1975). Physical and chemical properties. In Peat in Horticulture (D.W. Robinson and J.G.D. Lamb, eds). New York: Academic press, pp. 23–38.
- Puustjarvi, V. and Robertson, R.A. (1975). Physical and chemical properties. In Peat in Horticulture (D.W. Robinson and J.G.D. Lamb, eds). New York: Academic press, pp. 23–38.
- Quian, Y.L.; A.J. Koski y R. Welton. 2001. Amending sand with isolite and zeolite under saline conditions: leachate composition and salt deposition. HortScience 36: 717-720.
- Quintero, M. 2014. Sustratos para cultivo de flor cortada. Mejora de fertirriego en clavel. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería y Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Agronomía. Doctorado en Agricultura Protegida. Tesis de doctorado.
- Quintero, M. 2014. Sustratos para cultivo de flor cortada. Mejora de fertirriego en clavel. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería y Facultad de Ciencias Experimentales Departamento de Agronomía. Doctorado en Agricultura Protegida. Tesis de doctorado.
- Quintero, M., González, C., Guzmán, J. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. p. 79-108. En: Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo, Unibiblos, Bogotá.
- Quintero, M., Guzmán, J. y Valenzuela, J. 2012. Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavel (*Dianthus caryophyllus* L.). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 6(1): 76- 87.
- Quintero, M., M. Gúzman., J. Valenzuela y C. González. 2013. Utilización de la cascarilla de arroz en sistemas de cultivos sin suelo: Una revisión. Flor y Cultura. 2 Ed. Asocolflores. Bogotá. p. 35 - 42
- Quintero, M., M. Gúzman., J. Valenzuela y C. González. 2013. Utilización de la cascarilla de arroz en sistemas de cultivos sin suelo: Una revisión. Flor y Cultura. 2 Ed. Asocolflores. Bogotá. p. 35 - 42
- Quintero, M., Melgarejo, M., Ortega, D., Valenzuela, J., Guzmán, M. 2011. Temporal physicochemical variations in burnt rice husk: improvement of fertigation protocols in carnations crops. J. Food. Agric. Environ. 9(3-4): 77- 732.

- Quintero, M., Ortega, D., Valenzuela, J., Guzmán, M. 2013. Variation of hydro- physical properties of burnt rice husk used for carnation crops: Improvement of fertigation criteria. *Scientia Horticulturae*. 154: 82- 87.
- Quintero, M.F. González-Murillo, C.A. and Florez-Roncancio, V.J. 2006. Evaluación de las características hidro-físicas de los sustratos cascarilla de arroz quemada, fibra de coco y sus mezclas. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P: 451-462.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. ISBN 3-900051-07-0.
- Raviv, M y J. Heinrick. 2008. *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 546-548
- Raviv, M., Zaidman B.Z. y Kapulnik, Y. 1998. The use of compost as a peat substitute for organic vegetable transplants production. *Compost Science and Utilisation*, 6, 46–52.
- RHP. 2007. Product certificatie schema. Stichting RHP's Gravenzande, The Netherlands, Looseleaf Publication.
- Sánchez, P.G., Fernández, L.P., Trejo, L.T., Alcántar, G.G. and Cruz, J.D. 1999. Heavy metal accumulation in beans and its impact on growth and yield under soilless culture. *Acta Hortic.* 481, 617-624. DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.481.73 <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.73>
- Sarkar, D. 2008. *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5
- Schmitz, J., Dutra, P. y Kampf, A. 2002. Propiedades químicas e físicas de sustratos de origen mineral o organica para o cultivo de mudas em recipientes. *Ciencia Rural*, Santa Maria. 32(6): 937- 944.
- Serna, A. 2012. Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico, Pereira, Colombia. 53 p.
- Silber, A. 2008. Chemical Characteristics of Soilless Media En: Raviv, M y J. Heinrick (Ed). *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 210 - 239
- Silber, A., Bar-Yosef, B., Singer, A. y Chen, Y. 1994. Mineralogical and chemical composition of three tuffs from northern Israel. *Geoderma*, 63, 123–144.
- Silver, A y M. Raviv. 1996. Effects on chemical surface properties of tuff by growing rose plants. *Plant Soil*, 186. p. 353 – 360.
- Silver, A. 2008. Chemical Characteristics of Soilless Media in *Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 210 - 239
- Silver, A., Bar- Yosef, B., Suryano, S. y Levkovitch, I. 2012. Zinc adsorption by perlite: effects of pH, ionic strength, temperature, and pre-use as growth substrate. *Geoderma*. 170: 159- 167.
- Sonnevel, C y W. Voogt. 2009. *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer Science Business Media. Nueva York. 432 p.
- Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Dissertation. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 151 pp.
- Sposito, G. 2008. *The chemistry of soil*. Second edition. Oxford University press, Oxford.

- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reactions* (2nd edn). New York: John Wiley and Sons.
- Tan, H. 1986. Degradation of soil minerals by organic acids. In *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (P.M. Huang, M. Schnitzer, eds). SSSA, Spec. Pub. No. 17, Madison: Soil Science Society of America. p. 1 – 27.
- Tate, K y B. Theng. 1980. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In *Soils with Variable Charge* (B.K.G. Theng, ed.). New Zealand: Lower Hutt. p. 225 – 249.
- Terrés, L., Artetxe, A., Beunza, A., Sáins de la Maza, E. Lenzaun, M. 2001. Physical properties of the substrates. *Proc. 5th IS Protect. Cult. Mild Winter Clim* (Eds.) Fernández, Martínez & Castilla. *Acta Hort.* 559: 663- 668.
- Triana, Y., CASTIBLANCO, E., Flórez, V. 2006. Comportamiento de nutrientes en un sistema de cultivo sin suelo en rosa. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios, P: 249-263
- Ulloa, L., N. Vargas., D. Miranda y V. Flórez. 2006. Efecto de la salinidad sobre los parámetros de desarrollo en especies hortícolas cultivadas en sistemas sin suelo. En: Flórez (ed.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá. Unibiblios. P. 53 – 76
- Urbina, E., Baca, G., Núñez, R., Colinas, M., Tijerina, L., Tirado, J. 2006. Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargada con K⁺, Ca²⁺, o Mg²⁺ y diferente granulometría. *Agrociencia. Colegio de posgraduados. México. Vol 40 N° 004. P: 419:429*
- Van Soest, P., Robertson, J., Lewis, B. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J Dairy Sci.* 74, 3583-3597
- Velde, B., Meunier, A. 2008. *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer. Alemania. P: 61-62.
- Wallach, R. 2008. *Physical Characteristics of Soilless Media in Soilless culture – Theory and practice*. Elsevier. USA. p. 41 – 107 77.
- Wallach, R., Da Silva, F.y Chen, Y. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society Horticultural Science.* 117: 415: 421. 78.
- White, P. 2012. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. En: Marschner (Ed). *Mineral nutrition of higher plants*. Third edition. School of agriculture, Food and Wine. University of Adelaide Australia. Elsevier. P: 7:48
- Yalçın, N., & Sevinç, V. 2001. Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*, 27(2), 219–224. [http://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00068-7](http://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00068-7)
- Zanin, O., Mat Rasoi, A., Hassan, H. 1998. Irradiation effect on chemical components of oil palm empty fruit bunch and palm press fibre. *Nuclear Sci. J. Malaysia.* 16 (1): 21-30.

Anexos

ANEXO 1. Resultados de la comparación entre los tratamientos evaluados en el estudio “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”

Tabla 35. Propiedades químicas y concentración de iones en fase soluble, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación “Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales”.

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	CE	pH	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄
					dS m ⁻¹	Unid	mg L ⁻¹						
CA	100			CA100	1,5	10,2	7,1	1372,0	4,8	15,3	32,3	75,4	395,6
SC	100			SC100	0,7	6,3	10,4	386,6	4,6	153,8	185,3	368,0	25,5
CP	100			CP100	1,5	4,8							
		EC	100	EC100	0,9	6,7	56,7	312,4	39,6	43,5	67,5	945,8	33,2
		PE	100	PE100	0,0	8,3	5,6	18,7	0,6	24,8	39,9	39,6	3,9
		PP	100	PP100	0,7	9,6	8,0	123,8	1,2	187,4	154,8	312,5	10,9
		VE	100	VE100	0,1	6,7	8,8	48,6	35,9	11,6	83,5	32,6	1,6
		ZE	100	ZE100	0,1	8,1	5,8	2,1	1,5	15,4	32,1	38,6	0,1
CA	75	EC	25	CA75-EC25	0,6	8,0	3,0	825,8	5,6	22,4	57,4	498,4	526,7
CA	50	EC	50	CA50-EC50	0,6	7,7	12,9	707,7	17,2	31,5	57,4	588,1	308,4
CA	25	EC	75	CA25-EC75	0,5	7,1	15,3	378,8	35,9	38,5	66,0	771,4	63,5
CA	75	PE	25	CA75-PE25	0,7	9,1	7,4	908,5	10,2	17,3	60,3	94,9	1000,0
CA	50	PE	50	CA50-PE50	0,4	8,5	8,3	527,6	9,0	21,1	64,6	108,6	587,2
CA	25	PE	75	CA25-PE75	0,2	8,1	7,2	224,8	7,1	23,4	37,3	46,1	263,0
CA	75	PP	25	CA75-PP25	0,8	9,3	5,4	398,0	17,0	116,2	172,3	225,8	1479,0
CA	50	PP	50	CA50-PP50	0,6	8,5	8,9	805,7	9,9	148,2	80,4	262,5	787,0
CA	25	PP	75	CA25-PP75	0,5	8,6	6,8	338,1	6,8	164,9	105,3	381,4	339,9
CA	75	VE	25	CA75-VE25	0,3	8,1	13,1	611,2	65,6	19,9	89,0	166,5	689,7
CA	50	VE	50	CA50-VE50	0,3	8,0	21,1	491,7	149,4	19,6	91,9	126,9	1116,0
CA	25	VE	75	CA25-VE75	0,1	7,4	14,9	177,1	56,9	12,0	91,9	45,5	494,4
CA	75	ZE	25	CA75-ZE25	0,3	8,6	6,8	156,9	7,7	38,0	27,8	68,7	256,8
CA	50	ZE	50	CA50-ZE50	0,1	7,8	13,3	9,1	7,2	28,4	109,1	45,5	85,8
CA	25	ZE	75	CA25-ZE75	0,1	7,5	11,3	6,0	5,8	23,8	30,6	42,9	77,9
CP	75	EC	25	CP75-EC25			17,0	323,8	30,0	9,3			
CP	50	EC	50	CP50-EC50			19,6	328,6	20,2	17,7			
CP	25	EC	75	CP25-EC75			18,4	387,6	30,8	21,6			

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	CE	pH	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄
					dS m ⁻¹	Unid	mg L ⁻¹						
CP	75	PE	25	CP75-PE25			14,4	214,6	5,1	6,0			
CP	50	PE	50	CP50-PE50			15,5	183,4	5,4	6,9			
CP	25	PE	75	CP25-PE75			7,1	61,3	7,1	9,5			
CP	75	PP	25	CP75-PP25			11,8	269,7	27,4	32,4			
CP	50	PP	50	CP50-PP50			8,6	141,7	14,5	45,2			
CP	25	PP	75	CP25-PP75			9,0	63,2	7,3	75,1			
CP	75	VE	25	CP75-VE25			15,9	284,3	10,9	2,7			
CP	50	VE	50	CP50-VE50			8,0	50,6	18,8	1,9			
CP	25	VE	75	CP25-VE75			4,9	16,5	35,1	1,9			
CP	75	ZE	25	CP75-ZE25			28,5	87,9	19,6	63,3			
CP	50	ZE	50	CP50-ZE50			26,2	5,6	13,8	39,0			
CP	25	ZE	75	CP25-ZE75			17,3	3,2	6,2	18,7			
SC	75	EC	25	SC75-EC25	0,2	7,4	15,4	394,4	5,3	164,1	52,2	713,0	60,2
SC	50	EC	50	SC50-EC50	0,2	7,0	35,9	419,0	20,4	144,1	84,2	947,1	42,2
SC	25	EC	75	SC25-EC75	0,2	7,0	82,8	329,2	30,9	87,9	61,3	910,1	40,3
SC	75	PE	25	SC75-PE25	0,1	7,1	10,0	123,0	2,5	61,2	167,5	318,0	14,8
SC	50	PE	50	SC50-PE50	0,0	7,4	5,4	47,3	1,3	38,2	43,1	254,3	6,6
SC	25	PE	75	SC25-PE75	0,0	7,6	3,1	25,4	0,7	23,1	44,5	77,7	4,5
SC	75	PP	25	SC75-PP25	0,1	7,1	9,5	364,1	2,4	173,0	166,5	383,6	29,1
SC	50	PP	50	SC50-PP50	0,1	7,4	8,6	252,2	2,1	199,9	140,7	251,8	13,2
SC	25	PP	75	SC25-PP75	0,1	7,3	8,1	141,5	1,6	292,8	143,6	289,2	11,3
SC	75	VE	25	SC75-VE25	0,1	7,4	11,9	226,0	12,8	179,4	137,8	285,6	25,1
SC	50	VE	50	SC50-VE50	0,1	7,3	12,8	131,9	22,5	130,6	105,3	221,0	11,8
SC	25	VE	75	SC25-VE75	0,0	7,5	9,0	58,7	21,3	59,7	74,7	84,3	1,3
SC	75	ZE	25	SC75-ZE25	0,0	6,8	9,5	9,0	3,8	46,2	67,0	140,2	1,3
SC	50	ZE	50	SC50-ZE50	0,0	7,4	8,0	4,2	2,6	23,5	41,6	80,3	1,4
SC	25	ZE	75	SC25-ZE75	0,0	7,3	6,1	2,3	1,8	18,8	33,0	66,6	0,1

Tabla 36. Propiedades químicas y concentración de cationes en fase intercambiable, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales".

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	CIC	Ca	K	Mg	Na
					cmol _c Kg ⁻¹				
CA	100			CA100	7,1	7,3	1,4	1,9	0,2
SC	100			SC100	74,7	9,7	13,0	11,2	6,5
CP	100			CP100	10,5	1,8	5,0	3,2	0,1
		EC	100	EC100	4,2	4,6	0,1	0,5	0,3
		PE	100	PE100	8,4	1,8	0,6	0,5	0,2
		PP	100	PP100	6,2	4,4	0,5	0,6	3,0

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	CIC	Ca	K	Mg	Na
					cmol _c Kg ⁻¹				
		VE	100	VE100	27,3	1,3	0,2	18,1	0,1
		ZE	100	ZE100	23,0	52,0	1,0	6,2	16,6
CA	75	EC	25	CA75-EC25	7,5	4,4	9,5	0,9	0,5
CA	50	EC	50	CA50-EC50	5,5	3,1	3,5	0,7	0,4
CA	25	EC	75	CA25-EC75	5,9	3,9	2,0	0,8	0,4
CA	75	PE	25	CA75-PE25	11,3	2,1	6,9	0,7	0,4
CA	50	PE	50	CA50-PE50	13,1	1,4	3,8	0,5	0,3
CA	25	PE	75	CA25-PE75	11,3	1,6	2,2	0,7	0,4
CA	75	PP	25	CA75-PP25	12,9	3,1	9,3	2,6	1,4
CA	50	PP	50	CA50-PP50	13,2	2,4	6,5	3,5	1,9
CA	25	PP	75	CA25-PP75	14,0	1,8	2,6	4,8	2,6
CA	75	VE	25	CA75-VE25	31,2	4,0	5,8	0,6	0,3
CA	50	VE	50	CA50-VE50	49,5	3,6	4,1	0,5	0,3
CA	25	VE	75	CA25-VE75	67,6	3,4	2,5	0,4	0,2
CA	75	ZE	25	CA75-ZE25	12,8	24,0	4,4	34,0	19,9
CA	50	ZE	50	CA50-ZE50	11,6	26,5	1,9	42,6	23,1
CA	25	ZE	75	CA25-ZE75	13,1	30,8	1,1	56,1	30,5
CP	75	EC	25	CP75-EC25	6,2	3,0	6,5	3,2	0,2
CP	50	EC	50	CP50-EC50	5,6	3,1	4,1	1,7	0,3
CP	25	EC	75	CP25-EC75	7,4	3,2	3,7	1,7	0,2
CP	75	PE	25	CP75-PE25	6,1	0,4	1,6	0,5	0,1
CP	50	PE	50	CP50-PE50	6,9	0,3	1,5	1,0	0,0
CP	25	PE	75	CP25-PE75	10,9	0,1	0,7	0,2	0,1
CP	75	PP	25	CP75-PP25	5,9	0,3	1,7	0,6	0,2
CP	50	PP	50	CP50-PP50	9,8	1,5	1,9	0,6	1,0
CP	25	PP	75	CP25-PP75	12,1	0,9	1,1	0,5	0,9
CP	75	VE	25	CP75-VE25	22,9	0,9	1,7	22,2	0,0
CP	50	VE	50	CP50-VE50	26,9	0,9	1,8	18,7	0,0
CP	25	VE	75	CP25-VE75	27,3	2,1	3,5	58,7	0,1
CP	75	ZE	25	CP75-ZE25	5,4	13,3	1,5	3,7	14,2
CP	50	ZE	50	CP50-ZE50	6,2	37,4	1,1	7,3	50,0
CP	25	ZE	75	CP25-ZE75	7,8	27,1	0,5	4,9	31,6
SC	75	EC	25	SC75-EC25	27,8	4,8	2,9	3,1	1,7
SC	50	EC	50	SC50-EC50	15,1	5,0	2,0	1,9	1,1
SC	25	EC	75	SC25-EC75	9,5	3,7	1,3	1,0	0,6
SC	75	PE	25	SC75-PE25	32,7	2,5	2,8	2,7	1,5
SC	50	PE	50	SC50-PE50	26,0	1,9	2,0	2,0	1,1
SC	25	PE	75	SC25-PE75	13,0	1,2	0,8	0,9	0,5

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	CIC	Ca	K	Mg	Na
					cmol _c Kg ⁻¹				
SC	75	PP	25	SC75-PP25	45,1	5,6	4,5	7,3	4,0
SC	50	PP	50	SC50-PP50	30,4	2,8	1,9	4,6	2,5
SC	25	PP	75	SC25-PP75	20,9	2,4	0,9	4,4	2,4
SC	75	VE	25	SC75-VE25	69,0	6,8	3,9	6,9	3,7
SC	50	VE	50	SC50-VE50	66,9	5,7	3,1	4,3	2,3
SC	25	VE	75	SC25-VE75	74,8	4,3	2,0	1,9	1,0
SC	75	ZE	25	SC75-ZE25	23,3	27,8	1,4	45,7	24,9
SC	50	ZE	50	SC50-ZE50	16,6	26,9	0,8	42,1	22,9
SC	25	ZE	75	SC25-ZE75	12,8	28,4	0,7	50,8	27,6

Tabla 37. Propiedades químicas y concentración de micronutrientes y P disponibles, determinadas previamente a su uso (en crudo) como medio de cultivo de esquejes de clavel en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales".

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	Cu	Fe	Mn	Zn	P
					mg Kg ⁻¹				
CA	100			CA100	0,5	3,5	35,1	5,1	1052,3
SC	100			SC100	2,0	15,7	12,7	9,1	12,5
CP	100			CP100					
		EC	100	EC100	4,6	14,7	5,9	6,4	376,6
		PE	100	PE100	0,5	2,8	5,1	1,2	17,9
		PP	100	PP100	0,3	2,5	2,1	2,7	15,8
		VE	100	VE100	2,0	21,5	48,47	3,9	4,2
		ZE	100	ZE100	0,1	2,2	4,1	0,2	4,6
CA	75	EC	25	CA75-EC25	3,7	9,0	33,6	9,1	911,9
CA	50	EC	50	CA50-EC50	4,6	12,1	22,8	8,1	627,3
CA	25	EC	75	CA25-EC75	4,8	12,9	12,3	6,9	340,4
CA	75	PE	25	CA75-PE25	0,6	3,2	30,8	6,5	1055,0
CA	50	PE	50	CA50-PE50	0,5	2,0	24,4	5,5	398,5
CA	25	PE	75	CA25-PE75	0,5	2,8	16,7	3,6	217,4
CA	75	PP	25	CA75-PP25	0,5	3,2	24,4	6,3	1088,0
CA	50	PP	50	CA50-PP50	0,4	2,9	23,9	4,7	659,3
CA	25	PP	75	CA25-PP75	0,3	2,7	11,9	3,8	285,4
CA	75	VE	25	CA75-VE25	1,2	11,5	66,5	13,3	1581,0
CA	50	VE	50	CA50-VE50	1,5	18,9	58,9	10,1	1184,0
CA	25	VE	75	CA25-VE75	1,7	23,8	53,9	7,0	555,6
CA	75	ZE	25	CA75-ZE25	0,4	3,0	20,2	3,5	624,8
CA	50	ZE	50	CA50-ZE50	0,4	2,8	8,2	1,5	273,1
CA	25	ZE	75	CA25-ZE75	0,2	3,0	6,3	1,1	75,7

ORG	%	MIN	%	SUSTRATO	Cu	Fe	Mn	Zn	P
					mg Kg ⁻¹				
CP	75	EC	25	CP75-EC25					
CP	50	EC	50	CP50-EC50					
CP	25	EC	75	CP25-EC75					
CP	75	PE	25	CP75-PE25					
CP	50	PE	50	CP50-PE50					
CP	25	PE	75	CP25-PE75					
CP	75	PP	25	CP75-PP25					
CP	50	PP	50	CP50-PP50					
CP	25	PP	75	CP25-PP75					
CP	75	VE	25	CP75-VE25					
CP	50	VE	50	CP50-VE50					
CP	25	VE	75	CP25-VE75					
CP	75	ZE	25	CP75-ZE25					
CP	50	ZE	50	CP50-ZE50					
CP	25	ZE	75	CP25-ZE75					
SC	75	EC	25	SC75-EC25	4,8	33,4	13,0	9,6	314,9
SC	50	EC	50	SC50-EC50	6,7	25,6	6,1	9,3	363,1
SC	25	EC	75	SC25-EC75	4,4	17,3	6,6	6,7	450,7
SC	75	PE	25	SC75-PE25	1,1	8,1	6,3	5,1	4,2
SC	50	PE	50	SC50-PE50	0,9	4,6	5,6	2,8	11,5
SC	25	PE	75	SC25-PE75	0,7	2,6	5,5	1,9	12,1
SC	75	PP	25	SC75-PP25	1,7	11,2	6,0	7,2	7,3
SC	50	PP	50	SC50-PP50	0,9	7,0	4,6	4,6	5,1
SC	25	PP	75	SC25-PP75	0,4	2,3	2,7	2,5	10,8
SC	75	VE	25	SC75-VE25	3,3	22,6	30,5	8,8	13,9
SC	50	VE	50	SC50-VE50	3,0	20,3	41,9	6,8	8,5
SC	25	VE	75	SC25-VE75	2,2	17,9	42,3	4,9	5,8
SC	75	ZE	25	SC75-ZE25	0,4	4,4	8,6	1,6	4,3
SC	50	ZE	50	SC50-ZE50	0,2	2,8	5,0	0,4	4,7
SC	25	ZE	75	SC25-ZE75	0,1	2,7	4,6	0,3	4,6

Tabla 38. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CE ds m ⁻¹	pH	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄
			mg L ⁻¹						

SUSTRATO	CE		pH		Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄							
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CA100	0,40	a	8,20	A	27,17	cdefghijkl	611,40	a	44,63	de	130,50	ijklmn	173,50	ijkl	21,90	gh	826,30	a
CP100	0,20	bcdef	7,07	ijklmnopq	28,87	cdefghijk	142,90	efg	34,10	ef	115,80	klmnopq	129,20	klmno	59,40	efgh	76,70	efghij
SC100	0,33	ab	7,17	fghijklmnop	15,43	ijklmnop	125,30	fghi	7,20	mno	330,20	bc	335,60	defg	242,20	ab	23,67	ij
EC100	0,10	ef	6,50	R	67,10	a	13,87	pq	12,10	ijklmno	71,13	pqrst	97,30	lmno	204,10	abc	16,57	ij
PE100	0,10	ef	6,73	opqr	40,40	bcd	6,40	q	8,93	lmno	33,10	tu	73,00	lmno	34,27	fgh	0,10	j
PP100	0,23	bcde	7,53	bcdefghi	43,07	bc	5,57	q	9,73	klmno	68,00	qrstu	107,40	lmno	18,67	gh	0,53	j
VE100	0,27	abcd	7,63	Bcdefgh	19,90	hijklmnop	45,67	klmnopq	68,70	bc	272,30	de	451,70	bc	39,37	fgh	0,17	j
ZE100	0,10	ef	7,23	efghijklmno	10,13	mnop	0,50	q	3,03	o	19,67	u	27,03	o	14,37	h	0,60	j
CA75-ZE25	0,10	ef	7,67	Abcdefg	49,60	b	25,60	nopq	29,77	efg	76,93	opqrst	109,30	klmno	15,17	h	221,40	c
CA75-VE25	0,33	ab	8,00	ab	19,63	hijklmnop	321,50	b	54,93	cd	212,00	ghi	333,10	defg	26,97	gh	417,30	b
CA75-PP25	0,20	bcdef	7,80	abcd	26,23	defghijklmn	124,50	fghi	14,20	ghijklmno	118,50	klmnop	174,90	ijkl	21,67	gh	113,00	defgh
CA75-PE25	0,10	ef	7,37	cdefghijkl	20,83	ghijklmnop	19,33	opq	8,77	lmno	78,73	opqrst	113,70	klmno	36,60	fgh	16,27	ij
CA75-EC25	0,20	bcdef	7,77	abcde	22,33	fghijklmnop	214,00	cd	19,97	fghijklmn	109,00	lmnopqr	159,90	ijkl	91,70	defgh	217,70	c
CA50-ZE50	0,10	ef	7,57	bcdefghi	39,40	bcde	7,43	q	14,53	ghijklmno	58,97	rstu	51,07	mno	15,37	h	143,80	cde
CA50-VE50	0,30	abc	7,90	abc	24,40	defghijklmno	208,00	cde	65,33	c	238,50	efg	384,00	cde	18,70	gh	370,60	b
CA50-PP50	0,20	bcdef	7,73	abcde	23,37	efghijklmnop	92,27	fghijklmn	10,60	ijklmno	105,30	mnopqr	166,10	ijkl	24,50	gh	79,03	defghij
CA50-PE50	0,13	def	7,67	abcdefg	15,07	klmnop	59,40	ijklmnopq	10,83	ijklmno	79,17	opqrst	142,00	ijklm	25,07	gh	84,63	defghij
CA50-EC50	0,17	cdef	7,60	bcdefghi	27,47	cdefghijkl	108,00	fghijk	12,77	ijklmno	77,80	opqrst	126,00	klmno	286,50	a	141,30	cdef
CA25-ZE75	0,10	ef	7,43	cdefghijk	33,77	bcdefgh	3,80	q	11,07	ijklmno	60,53	rstu	35,50	no	62,50	efgh	124,00	defg
CA25-VE75	0,30	abc	7,70	abcdef	23,43	efghijklmnop	93,30	fghijklm	63,47	c	253,20	defg	430,30	bcd	31,20	gh	165,10	cd
CA25-PP75	0,17	cdef	7,73	abcde	31,27	cdefghijk	34,83	mnopq	15,07	ghijklmno	107,00	lmnopqr	165,50	ijkl	17,07	gh	56,97	efghij
CA25-PE75	0,17	cdef	7,73	abcde	19,10	hijklmnop	112,80	fghij	25,00	fghijk	84,13	nopqrs	139,20	ijklm	20,70	gh	219,20	c
CA25-EC75	0,10	ef	7,47	bcdefghij	32,87	cdefghi	60,80	ijklmnopq	10,83	ijklmno	73,17	pqrst	111,30	klmno	85,80	defgh	92,93	defghi
CP75-ZE25	0,17	cdef	6,93	ijklmnopqr	31,80	cdefghij	54,20	ijklmnopq	21,70	fghijklm	94,07	nopqrs	254,30	fghi	58,57	efgh	28,90	hij
CP75-VE25	0,13	def	6,93	ijklmnopqr	37,50	bcdef	31,70	mnopq	15,77	ghijklmno	81,83	nopqrst	111,30	klmno	69,07	efgh	17,50	ij
CP75-PP25	0,23	bcde	6,90	klmnopqr	26,47	defghijklm	152,50	def	98,47	a	179,30	hij	238,30	ghij	98,23	defgh	63,57	efghij
CP75-PE25	0,20	bcdef	6,63	pqr	34,80	bcdefgh	85,03	ghijklmno	25,20	fghijk	115,70	klmnopq	96,47	lmno	61,93	efgh	78,17	defghij
CP75-EC25	0,20	bcdef	7,07	ijklmnopq	26,93	cdefghijkl	108,00	fghijk	32,20	ef	116,30	klmnopq	120,80	klmno	58,43	efgh	86,73	defghij
CP50-ZE50	0,20	bcdef	6,97	ijklmnopqr	27,60	cdefghijkl	106,00	fghijkl	61,07	c	145,30	ijklm	168,30	ijkl	62,53	efgh	61,07	efghij
CP50-VE50	0,17	cdef	6,90	klmnopqr	31,83	cdefghij	115,30	fghij	23,63	fghijkl	105,00	mnopqr	129,20	klmno	51,67	efgh	57,57	efghij
CP50-PP50	0,13	def	6,77	nopqr	36,73	bcdefg	6,73	q	13,73	hijklmno	98,40	mnopqr	100,10	lmno	47,33	fgh	27,57	hij
CP50-PE50	0,17	cdef	6,80	mnopqr	38,17	bcdef	84,43	ghijklmno	25,60	fghij	113,40	klmnopq	104,50	lmno	66,80	efgh	65,03	efghij
CP50-EC50	0,20	bcdef	6,87	lmnopqr	33,73	bcdefghi	49,73	ijklmnopq	29,37	efgh	118,60	klmnop	140,00	ijklm	57,07	efgh	69,43	efghij
CP25-ZE75	0,33	ab	7,10	hijklmnopq	30,53	cdefghijk	158,40	cdef	82,97	ab	156,50	jkl	261,20	fghi	72,27	efgh	73,20	efghij
CP25-VE75	0,13	def	7,07	ijklmnopq	35,30	bcdefgh	48,87	ijklmnopq	21,67	fghijklm	102,10	mnopqr	123,20	klmno	56,60	efgh	49,20	ghij
CP25-PP75	0,07	f	6,57	qr	40,23	bcd	7,27	q	14,50	ghijklmno	96,43	mnopqrs	39,40	mno	33,23	fgh	55,50	fghij
CP25-PE75	0,10	ef	7,13	ghijklmnop	40,20	bcd	24,07	opq	14,77	ghijklmno	90,27	nopqrs	105,70	lmno	61,93	efgh	23,17	ij
CP25-EC75	0,20	bcdef	6,63	pqr	39,60	bcde	48,93	ijklmnopq	25,27	fghijk	124,90	klmno	134,00	ijklm	65,03	efgh	79,77	defghij
SC75-ZE25	0,10	ef	7,07	ijklmnopq	22,60	fghijklmnop	5,73	q	10,17	ijklmno	83,90	nopqrs	140,00	ijklm	38,70	fgh	7,37	ij

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		Cl		SO ₄		PO ₄	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
SC75-VE25	0,30	abc	7,27	defghijklmno	20,87	ghijklmnop	220,70	c	28,13	fghi	421,90	a	688,20	a	173,90	bcd	28,40	hij
SC75-PP25	0,20	bcdef	7,23	efghijklmno	8,73	op	107,30	fghijk	4,33	no	341,90	bc	415,60	bcd	98,70	defgh	23,07	ij
SC75-PE25	0,10	ef	7,33	defghijklm	9,70	nop	139,90	fgh	3,73	o	265,60	def	349,30	cdef	117,50	cdefg	15,50	ij
SC75-EC25	0,10	ef	7,47	bcdefghij	11,40	lmnop	52,43	ijklmnopq	4,33	no	291,80	cd	288,70	efgh	133,90	cdef	85,63	defghij
SC50-ZE50	0,10	ef	7,27	defghijklmno	17,20	ijklmnop	2,30	q	5,73	no	59,27	rstu	82,57	lmno	75,27	defgh	2,90	j
SC50-VE50	0,30	abc	7,30	defghijklmn	20,10	hijklmnop	126,00	fghi	44,50	de	379,90	ab	624,10	a	151,30	bcde	17,70	ij
SC50-PP50	0,20	bcdef	7,40	cdefghijkl	11,80	lmnop	34,83	mnopq	6,17	mno	217,20	fgh	252,40	fghi	81,07	defgh	7,67	ij
SC50-PE50	0,20	bcdef	7,43	cdefghijk	6,93	p	39,73	lmnopq	2,57	o	162,60	ijk	213,00	hijk	68,50	efgh	5,70	j
SC50-EC50	0,17	cdef	7,13	ghijklmnop	23,93	defghijklmno	15,37	pq	11,63	ijklmno	116,30	klmnopq	167,90	ijkl	82,43	defgh	44,43	ghij
SC25-ZE75	0,10	ef	7,43	cdefghijk	12,07	lmnop	1,07	q	3,53	o	46,70	stu	71,00	lmno	27,97	gh	1,27	j
SC25-VE75	0,23	bcde	7,30	defghijklmn	20,00	hijklmnop	75,17	hijklmnop	56,27	cd	325,80	c	506,30	b	73,47	defgh	2,47	j
SC25-PP75	0,20	bcdef	7,47	bcdefghij	8,57	op	36,23	mnopq	4,63	no	180,70	hij	285,80	efgh	236,50	ab	5,07	j
SC25-PE75	0,10	ef	7,33	defghijklm	9,33	op	17,43	pq	5,13	no	92,87	nopqrs	142,80	jklm	46,53	fgh	2,10	j
SC25-EC75	0,10	ef	7,27	defghijklmno	33,00	cdefghi	12,20	pq	9,67	klmno	78,20	opqrst	112,10	klmno	86,87	defgh	27,33	hij

Tabla 39. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		Cl		SO ₄		PO ₄	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CA100	0,40	a	8,20	a	27,17	cdef	611,40	a	44,63	ab	130,50	defg	173,50	defg	21,90	ef	826,30	a
CP100	0,20	cdef	7,07	cdefg	28,87	bcde	142,90	bc	34,10	abc	115,80	defg	129,20	efg	59,40	def	76,70	def
SC100	0,33	ab	7,17	cdef	15,43	efg	125,30	bcd	7,20	c	330,20	ab	335,60	bc	242,20	a	23,67	ef
EC100	0,10	f	6,50	g	67,10	a	13,87	cd	12,10	bc	71,13	fg	97,30	fg	204,10	ab	16,57	ef
PE100	0,10	f	6,73	fg	40,40	bc	6,40	d	8,93	bc	33,10	fg	73,00	fg	34,27	ef	0,10	f
PP100	0,23	bcde	7,53	bc	43,07	b	5,57	d	9,73	bc	68,00	fg	107,40	fg	18,67	f	0,53	f
VE100	0,27	abcd	7,63	abc	19,90	defg	45,67	cd	68,70	a	272,30	bc	451,70	b	39,37	ef	0,17	f
ZE100	0,10	f	7,23	cde	10,13	fg	0,50	d	3,03	c	19,67	g	27,03	g	14,37	f	0,60	f
CA_EC	0,16	def	7,61	bc	27,56	cde	127,60	bc	14,52	bc	86,66	fg	132,40	efg	154,70	ab	150,60	cd
CA_PE	0,13	ef	7,59	bc	18,33	efg	63,86	cd	14,87	bc	80,68	fg	131,60	efg	27,46	ef	106,70	cde
CA_PP	0,19	cdef	7,76	ab	26,96	cdef	83,87	cd	13,29	bc	110,20	defg	168,80	defg	21,08	f	83,00	cdef
CA_VE	0,31	ab	7,87	ab	22,49	def	207,60	b	61,24	a	234,60	bc	382,50	b	25,62	ef	317,70	b
CA_ZE	0,10	f	7,56	bc	40,92	b	12,28	d	18,46	bc	65,48	fg	65,28	g	31,01	ef	163,10	c
CP_EC	0,20	cde	6,86	efg	33,42	bc	68,90	cd	28,94	bc	119,90	defg	131,60	efg	60,18	def	78,64	def
CP_PE	0,16	def	6,86	efg	37,72	bc	64,51	cd	21,86	bc	106,50	defg	102,20	fg	63,56	cdef	55,46	ef
CP_PP	0,14	def	6,74	fg	34,48	bc	55,51	cd	42,23	ab	124,70	defg	125,90	fg	59,60	def	48,88	ef

SUSTRATO	CE		pH		Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄							
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CP_VE	0,14	def	6,97	defg	34,88	bc	65,29	cd	20,36	bc	96,31	efg	121,20	fg	59,11	def	41,42	ef
CP_ZE	0,23	bcd	7,00	defg	29,98	bcd	106,20	cd	55,24	a	132,00	def	227,90	cde	64,46	cdef	54,39	ef
SC_EC	0,12	ef	7,29	cd	22,78	def	26,67	cd	8,54	c	162,10	de	189,60	def	101,10	bode	52,47	ef
SC_PE	0,13	ef	7,37	c	8,66	g	65,68	cd	3,81	c	173,70	cd	235,00	cd	77,50	cdef	7,77	f
SC_PP	0,20	cdef	7,37	c	9,70	g	59,47	cd	5,04	c	246,60	bc	317,90	bc	138,80	abc	11,93	f
SC_VE	0,28	abc	7,29	cd	20,32	def	140,60	bc	42,97	ab	375,90	a	606,20	a	132,90	bcd	16,19	f
SC_ZE	0,10	f	7,26	cd	17,29	efg	3,03	d	6,48	c	63,29	fg	97,84	fg	47,31	ef	3,84	f

Tabla 40. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca	K	Mg	Na	Cl	SO ₄	PO ₄							
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CA100	0,37	a	8,03	a	49,27	bcdefghijk	332,00	a	67,13	de	190,60	fghi	263,20	cdefg	43,73	nopqr	294,70	b
CP100	0,23	abcde	6,57	opq	56,77	bcdefgh	82,57	defghijk	47,10	fgh	174,00	fghijk	109,70	klm	69,77	ijklmnopqr	115,80	de
SC100	0,27	abcd	7,30	defghijk	4,30	s	42,30	ijklmno	2,80	q	148,60	ghijkl	117,50	klm	72,47	ijklmnopqr	16,70	lmno
EC100	0,10	e	7,17	fghijkl	57,43	bcdefg	9,03	mno	12,60	klmnopq	84,57	ijklmn	132,80	ijklm	80,77	ghijklmnop	9,47	mno
PE100	0,10	e	7,23	efghijk	38,87	fghijklmnop	10,10	mno	8,47	mnopq	66,67	lmn	104,10	klm	39,13	opqr	0,37	o
PP100	0,20	bcde	7,43	bcdefghi	32,10	ghijklmnopqr	6,70	no	7,97	mnopq	67,63	lmn	101,10	klm	19,70	qr	2,73	o
VE100	0,20	bcde	7,37	cdefghij	26,03	klmnopqrs	62,10	fghijklmno	75,70	cd	364,50	bc	560,70	a	75,63	hijklmnopq	6,17	no
ZE100	0,10	e	7,03	hijklmno	11,20	qrs	0,70	o	3,40	q	22,77	n	27,93	m	15,90	r	0,27	o
CA75-EC25	0,20	bcde	7,53	abcdefgh	39,73	efghijklmnop	121,70	bcdefg	24,83	ijklmno	122,70	hijklmn	175,40	efghijk	69,87	ijklmnopqr	93,60	defg
CA75-PE25	0,30	abc	7,83	abc	39,20	efghijklmnop	130,30	bcdef	55,37	ef	167,50	fghijkl	295,90	bcd	52,03	mnopqr	161,60	c
CA75-PP25	0,30	abc	7,80	abcd	56,20	bcdefghi	167,20	bc	29,80	hijkl	167,80	fghijkl	305,10	bc	38,33	pqr	107,10	def
CA75-VE25	0,33	ab	7,77	abcd	65,87	bcd	376,30	a	131,40	a	331,20	bcd	550,40	a	121,50	cdefghij	443,60	a
CA75-ZE25	0,27	abcd	7,90	ab	95,90	a	24,87	ijklmno	46,87	fgh	103,40	ijklmn	252,80	cdefghi	34,73	pqr	164,90	c
CA50-EC50	0,20	bcde	7,33	cdefghijk	53,77	bcdefghij	82,07	defghijk	21,33	ijklmnopq	105,40	ijklmn	152,40	fghijkl	150,30	bcd	64,40	fghij
CA50-PE50	0,27	abcd	7,90	ab	37,97	fghijklmnop	145,60	bcd	35,07	ghi	132,40	hijklm	278,70	cde	62,40	klmnopqr	126,40	cd
CA50-PP50	0,23	abcde	7,60	abcdefg	50,53	bcdefghijk	110,70	bcdefgh	22,47	ijklmnop	149,60	ghijkl	257,60	cdefgh	40,53	nopqr	50,73	ghijklm
CA50-VE50	0,23	abcde	7,73	abcde	54,10	bcdefghij	178,70	b	110,80	b	358,80	bc	561,50	a	157,80	bc	169,50	c
CA50-ZE50	0,20	bcde	7,93	ab	61,43	bcdef	6,37	no	25,23	ijklmn	99,97	ijklmn	114,90	klm	32,13	pqr	132,00	cd
CA25-EC75	0,17	cde	7,47	bcdefghi	55,13	bcdefghij	48,70	hijklmno	20,67	ijklmnopq	125,90	hijklmn	165,10	efghijk	130,90	cdefgh	48,83	hijklmn
CA25-PE75	0,20	bcde	7,57	abcdefg	47,00	cdefghijklm	38,73	ijklmno	17,23	ijklmnopq	125,30	hijklmn	164,30	efghijk	50,50	mnopqr	30,53	hijklmno
CA25-PP75	0,27	abcd	7,63	abcdef	33,87	ghijklmnopq	43,20	hijklmno	14,10	klmnopq	101,10	ijklmn	156,60	fghijkl	19,87	qr	30,50	hijklmno
CA25-VE75	0,20	bcde	7,80	abcd	41,87	cdefghijklmno	101,30	cdefghi	89,47	c	377,00	b	555,10	a	97,37	defghijklmno	61,70	ghijk
CA25-ZE75	0,10	e	7,80	abcd	17,47	opqrs	2,30	o	7,93	mnopq	38,03	mn	37,83	lm	27,17	pqr	28,27	ijklmno
CP75-EC25	0,20	bcde	6,57	opq	64,53	bcde	64,17	fghijklmno	34,97	ghi	137,00	hijklm	132,00	ijklm	117,40	cdefghijkl	93,43	defg

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		Cl		SO ₄		PO ₄	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CP75-PE25	0,20	bcde	6,63	mnopq	23,80	lmnopqrs	137,50	bcde	25,50	ijklm	135,90	hijklm	147,60	ghijklm	52,77	mnopqr	74,03	efgh
CP75-PP25	0,20	bcde	6,43	q	43,40	cdefghijklmn	57,30	ghijklmno	30,20	hijkl	141,10	hijklm	124,10	klm	56,63	mnopqr	54,73	ghijkl
CP75-VE25	0,30	abc	6,60	nopq	23,43	lmnopqrs	134,40	bcde	57,43	def	186,40	ghij	132,30	ijklm	58,20	mnopqr	71,53	fghi
CP75-ZE25	0,10	e	6,43	q	34,10	ghijklmnopq	5,43	no	13,00	klmnopq	84,53	ijklm	84,57	klm	58,53	mnopqr	27,80	ijklmno
CP50-EC50	0,20	bcde	7,13	fghijklm	73,10	ab	25,23	ijklmno	26,83	ijklm	130,60	hijklm	169,90	efghijk	98,47	cdefghijklmn	33,40	hijklmno
CP50-PE50	0,17	cde	6,83	klmnopq	31,27	ijklmnopqr	56,60	ghijklmno	21,70	ijklmnopq	125,50	hijklm	109,70	klm	54,50	mnopqr	33,77	hijklmno
CP50-PP50	0,20	bcde	6,50	pq	46,63	cdefghijklm	49,43	hijklmno	31,33	hijk	143,40	ghijkl	148,30	ghijkl	51,30	mnopqr	41,33	hijklmno
CP50-VE50	0,20	bcde	6,53	opq	23,30	lmnopqrs	79,10	defghijkl	63,40	def	144,30	ghijkl	146,40	ghijklm	80,13	ghijklmnop	48,60	hijklm
CP50-ZE50	0,10	e	6,40	q	40,83	defghijklmnop	8,17	no	15,63	ijklmnopq	84,00	ijklm	78,97	klm	54,80	mnopqr	41,00	hijklmno
CP25-EC75	0,20	bcde	7,10	ghijklmn	67,13	bc	27,03	ijklmno	20,30	ijklmnopq	126,30	hijklm	142,40	hijklm	118,10	cdefghijk	15,37	lmno
CP25-PE75	0,17	cde	6,87	ijklmnopq	31,70	hijklmnopqr	58,20	ghijklmno	18,80	ijklmnopq	108,50	ijklm	138,80	hijklm	59,67	lmnopqr	24,83	ijklmno
CP25-PP75	0,20	bcde	6,53	opq	48,40	bcdefghijkl	32,47	ijklmno	24,83	ijklmno	142,40	ghijklm	169,90	efghijk	48,77	mnopqr	17,80	klmno
CP25-VE75	0,27	abcd	6,63	mnopq	17,10	opqrs	122,80	bcdefg	67,53	de	180,80	fghij	272,40	cdef	72,33	ijklmnopqr	24,07	ijklmno
CP25-ZE75	0,10	e	6,67	lmnopq	25,17	klmnopqrs	1,67	o	8,57	mnopq	73,00	klmn	73,40	klm	42,40	nopqr	6,10	no
SC75-EC25	0,13	de	7,30	defghijk	8,23	rs	28,47	ijklmno	4,30	pq	164,90	fghijkl	172,30	efghijk	102,90	cdefghijklm	49,40	ghijklmn
SC75-PE25	0,13	de	7,23	efghijk	6,87	rs	32,37	ijklmno	3,50	q	162,10	ghijkl	180,70	defghijk	117,70	cdefghijkl	8,87	mno
SC75-PP25	0,27	abcd	7,33	cdefghijk	15,53	pqrs	77,13	efghijklm	6,07	opq	270,00	cdef	348,10	bc	82,00	fghijklmnop	11,60	lmno
SC75-VE25	0,17	cde	7,50	bcdefghi	12,10	qrs	84,57	defghij	12,20	lmnopq	310,20	bcde	357,40	bc	133,10	cdefgh	14,67	lmno
SC75-ZE25	0,10	e	7,13	fghijklm	30,30	ijklmnopqr	6,87	no	13,67	klmnopq	107,70	ijklm	179,10	defghijk	57,60	mnopqr	3,67	o
SC50-EC50	0,17	cde	7,00	ijklmnop	30,17	ijklmnopqr	14,27	klmno	12,63	klmnopq	137,30	hijklm	178,30	defghijk	141,10	bcde	29,33	ijklmno
SC50-PE50	0,20	bcde	7,30	defghijk	6,90	rs	46,97	hijklmno	5,43	pq	217,40	efgh	244,90	cdefghij	130,70	cdefghi	13,73	lmno
SC50-PP50	0,33	ab	7,03	hijklmno	61,13	bcdef	72,53	efghijklmn	14,77	ijklmnopq	344,00	bcd	328,60	bc	84,67	efghijklmnop	15,70	lmno
SC50-VE50	0,20	bcde	7,33	cdefghijk	22,63	mnopqrs	63,00	fghijklmno	33,17	ghij	525,00	a	415,40	b	216,10	a	33,03	hijklmno
SC50-ZE50	0,10	e	7,23	efghijk	25,70	klmnopqrs	3,10	o	8,50	mnopq	93,13	ijklm	113,70	klm	84,87	efghijklmnop	4,00	o
SC25-EC75	0,13	de	7,03	hijklmno	36,23	fghijklmnopq	12,33	lmno	12,83	klmnopq	110,90	ijklm	169,90	efghijk	135,50	cdefg	16,63	lmno
SC25-PE75	0,10	e	7,37	cdefghij	17,73	opqrs	14,67	klmno	9,63	mnopq	127,60	hijklm	157,90	fghijkl	68,70	ijklmnopqr	4,37	o
SC25-PP75	0,27	abcd	7,10	ghijklmn	19,37	nopqrs	49,07	hijklmno	14,23	ijklmnopq	247,30	defg	268,80	cdef	198,70	ab	6,97	mno
SC25-VE75	0,20	bcde	7,37	cdefghij	26,27	klmnopqrs	57,63	ghijklmno	51,73	efg	330,50	bcd	412,40	b	139,10	cdef	9,53	mno
SC25-ZE75	0,10	e	7,13	fghijklm	21,73	mnopqrs	2,00	o	6,53	nopq	85,63	ijklm	94,53	klm	76,13	hijklmnopq	2,30	o

Tabla 41. Comparación de propiedades químicas y concentración de iones en la fase soluble de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		Cl		SO ₄		PO ₄	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹													
CA100	0,37	a	8,03	a	49,27	abcd	332,00	a	67,13	b	190,60	cd	263,20	cd	43,73	d	294,70	a

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		Cl		SO ₄		PO ₄		
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹														
CP100	0,23	abcd	6,57	g	56,77	abc	82,57	cde	47,10	bc	174,00	de	109,70	efg	69,77	cd	115,80	bc	
SC100	0,27	abcd	7,30	cde	4,30	e	42,30	cde	2,80	g	148,60	def	117,50	efg	72,47	cd	16,70	c	
EC100	0,10	e	7,17	cdef	57,43	abc	9,03	de	12,60	defg	84,57	def	132,80	efg	80,77	bcd	9,47	c	
PE100	0,10	e	7,23	cde	38,87	bcde	10,10	de	8,47	fg	66,67	ef	104,10	efg	39,13	d	0,37	c	
PP100	0,20	bcde	7,43	bcd	32,10	cde	6,70	de	7,97	fg	67,63	ef	101,10	efg	19,70	d	2,73	c	
VE100	0,20	bcde	7,37	bcd	26,03	cde	62,10	cde	75,70	b	364,50	ab	560,70	a	75,63	bcd	6,17	c	
ZE100	0,10	e	7,03	def	11,20	de	0,70	e	3,40	g	22,77	f	27,93	g	15,90	d	0,27	c	
CA_EC	0,19	cde	7,44	bc	49,54	abc	84,16	cd	22,28	cdefg	118,00	def	164,30	def	117,00	abc	68,94	c	
CA_PE	0,26	abcd	7,77	a	41,39	bcd	104,90	c	35,89	cd	141,70	def	246,30	cd	54,98	d	106,20	c	
CA_PP	0,27	abc	7,68	ab	46,87	abcd	107,00	c	22,12	cdefg	139,50	def	239,80	cd	32,91	d	62,77	c	
CA_VE	0,26	abcd	7,77	a	53,94	abc	218,80	b	110,60	a	355,70	ab	555,70	a	125,60	ab	224,90	ab	
CA_ZE	0,19	cde	7,88	a	58,27	ab	11,18	de	26,68	cdef	80,46	ef	135,20	efg	31,34	d	108,40	c	
CP_EC	0,20	bcd	6,93	ef	68,26	a	38,81	cde	27,37	cdef	131,30	def	148,10	defg	111,30	bc	47,40	c	
CP_PE	0,18	cde	6,78	fg	28,92	cde	84,09	cd	22,00	cdefg	123,30	def	132,00	efg	55,64	d	44,21	c	
CP_PP	0,20	bcd	6,49	g	46,14	abcd	46,40	cde	28,79	cde	142,30	def	147,40	defg	52,23	d	37,96	c	
CP_VE	0,26	abcd	6,59	g	21,28	de	112,10	c	62,79	b	170,50	de	183,70	de	70,22	cd	48,07	c	
CP_ZE	0,10	e	6,50	g	33,37	cde	5,09	e	12,40	efg	80,51	ef	78,98	fg	51,91	d	24,97	c	
SC_EC	0,14	de	7,11	def	24,88	cde	18,36	de	9,92	fg	137,70	def	173,50	de	126,50	ab	31,79	c	
SC_PE	0,14	de	7,30	cd	10,50	e	31,33	de	6,19	g	169,00	de	194,50	de	105,70	bc	8,99	c	
SC_PP	0,29	ab	7,16	cdef	32,01	cde	66,24	cde	11,69	efg	287,10	bc	315,20	bc	121,80	ab	11,42	c	
SC_VE	0,19	cde	7,40	bcd	20,33	de	68,40	cde	32,37	cd	388,60	a	395,10	b	162,80	a	19,08	c	
SC_ZE	0,10	e	7,17	cdef	25,91	cde	3,99	e	9,57	fg	95,49	def	129,10	efg	72,87	cd	3,32	c	

Tabla 42. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn		
	cmol _c Kg ⁻¹																mg Kg ⁻¹		
CA100	18,63	ijklmnop	7,83	fghijk	4,66	a	12,70	ghi	1,97	ghi	1,73	ghijklmnop	2,57	pqr	76,60	ab	15,17	ab	
CP100	8,60	nop	2,67	ijk	0,86	de	2,53	j	0,93	hi	4,57	abcd	12,43	ijklmnop	37,53	ef	11,07	cd	
SC100	83,73	ab	15,00	f	4,07	ab	16,30	fg	11,40	e	2,20	fghijklmnop	24,23	defgh	29,83	efg	13,67	abc	
EC100	9,60	mnop	3,80	hijk	0,11	e	0,57	j	0,63	i	4,07	bcdef	13,93	ijklmno	3,07	mn	4,37	ijklmnopqrs	
PE100	18,27	ijklmnop	0,67	k	0,22	e	0,20	j	0,50	i	0,23	op	0,93	r	1,63	n	0,83	rst	
PP100	20,93	ghijklmn	1,57	ijk	0,16	e	0,40	j	0,70	i	0,27	nop	1,60	qr	1,90	n	0,70	rst	
VE100	78,67	abc	5,50	ghijk	0,78	de	63,60	b	3,50	ghi	1,97	fghijklmnop	13,67	ijklmno	15,00	ghijklmn	2,90	nopqrst	

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
ZE100	10,40	lmnop	41,27	bc	0,66	de	2,93	j	15,80	d	0,10	p	1,30	r	1,63	n	0,20	t
CA75-EC25	15,53	klmnop	5,70	ghijk	1,72	bcde	3,30	j	0,93	hi	2,37	efghijklmno	13,40	ijklmno	40,57	de	7,87	defghij
CA75-PE25	16,43	klmnop	1,17	k	3,55	abc	0,50	j	0,43	i	0,57	mnop	4,43	opqr	16,47	ghijklmn	2,90	nopqrst
CA75-PP25	15,73	klmnop	3,83	hijk	4,06	ab	2,13	j	0,73	i	0,97	jklmnop	5,10	nopqr	53,20	cd	8,67	defghi
CA75-VE25	34,17	efg	5,50	ghijk	0,96	de	22,87	ef	1,57	hi	1,23	hijklmnop	7,00	mnopqr	63,03	bc	11,13	bcd
CA75-ZE25	11,97	klmnop	33,10	d	1,15	cde	5,77	hij	18,60	cd	1,00	jklmnop	2,73	pqr	25,97	efgh	7,23	defghijkl
CA50-EC50	10,83	klmnop	5,63	ghijk	1,17	cde	1,80	j	0,70	i	3,20	cdefghi	10,47	klmnopqr	20,73	ghij	7,67	defghijk
CA50-PE50	11,93	klmnop	1,70	ijk	1,99	bcde	1,37	j	0,47	i	0,73	lmnop	1,67	qr	20,67	ghij	3,77	klmnopqrst
CA50-PP50	19,43	ijklmnop	2,30	ijk	1,61	cde	1,13	j	0,50	i	0,70	lmnop	1,30	r	18,17	ghijklm	2,47	opqrst
CA50-VE50	39,40	def	5,70	ghijk	1,61	cde	37,37	d	1,67	hi	2,00	fghijklmnop	8,73	lmnopqr	79,10	a	9,37	defgh
CA50-ZE50	11,13	klmnop	39,60	bcd	1,24	cde	4,60	hij	21,33	bc	0,47	mnop	1,47	qr	9,70	ijklmn	1,97	pqrst
CA25-EC75	9,57	mnop	5,30	hijk	1,22	cde	1,27	j	0,70	i	2,97	cdefghijk	11,67	jklmnopq	8,73	ijklmn	5,63	hijklmnop
CA25-PE75	13,03	klmnop	2,73	ijk	1,10	de	3,20	j	0,80	i	0,93	klmnop	2,47	pqr	38,67	de	6,90	fghijklmn
CA25-PP75	20,47	hijklmno	1,93	ijk	0,35	e	0,60	j	0,60	i	0,37	mnop	1,20	r	3,83	mn	1,37	qrst
CA25-VE75	52,13	d	6,47	ghijk	1,34	cde	53,23	c	2,73	ghi	2,13	fghijklmnop	10,90	klmnopqr	83,70	a	5,10	ijklmnopq
CA25-ZE75	12,93	klmnop	35,80	cd	1,09	de	3,53	j	15,80	d	0,23	op	1,00	r	5,17	klmn	1,00	rst
CP75-EC25	8,83	nop	2,17	ijk	0,29	e	2,27	j	0,80	i	2,37	efghijklmno	6,73	mnopqr	17,57	ghijklm	5,60	hijklmnop
CP75-PE25	8,23	nop	1,63	ijk	0,38	de	1,20	j	0,80	i	2,80	cdefghijkl	27,83	def	7,67	ijklmn	4,43	jklmnopqrs
CP75-PP25	30,43	fghij	3,70	hijk	1,22	cde	27,07	e	1,50	hi	2,93	cdefghijk	18,57	fghijkl	20,00	ghijkl	3,20	lmnopqrst
CP75-VE25	6,40	p	1,97	ijk	0,42	de	0,80	j	0,57	i	3,30	cdefghi	15,27	ghijklmn	4,60	lmn	6,17	ghijklmno
CP75-ZE25	11,93	klmnop	1,57	ijk	0,59	de	0,67	j	0,80	i	2,53	defghijklm	5,43	nopqr	9,70	ijklmn	3,17	mnopqrst
CP50-EC50	10,67	klmnop	3,03	hijk	0,27	e	2,30	j	0,87	hi	6,37	a	16,90	ghijklm	53,37	cd	15,30	a
CP50-PE50	8,33	nop	3,10	hijk	0,36	e	1,10	j	0,70	i	2,50	defghijklm	28,17	def	5,50	ijklmn	3,83	jklmnopqrst
CP50-PP50	12,40	klmnop	24,03	e	1,23	cde	2,80	j	22,73	ab	1,17	hijklmnop	8,13	mnopqr	8,77	ijklmn	2,70	opqrst
CP50-VE50	7,40	op	1,20	k	0,51	de	0,87	j	0,67	i	2,43	defghijklmn	5,07	nopqr	7,20	ijklmn	5,97	ghijklmnop
CP50-ZE50	21,07	ghijklmn	2,50	ijk	0,88	de	13,20	gh	1,13	hi	3,33	cdefgh	22,57	efghi	19,73	ghijkl	2,17	opqrst
CP25-EC75	11,80	klmnop	1,83	ijk	0,42	de	1,50	j	0,80	i	2,87	cdefghijkl	28,40	cdef	9,07	ijklmn	3,80	klmnopqrst
CP25-PE75	7,90	nop	2,67	ijk	0,17	e	0,67	j	0,47	i	3,43	bcdefg	25,07	defg	4,73	klmn	6,07	ghijklmno
CP25-PP75	11,07	klmnop	24,77	e	1,10	de	2,63	j	25,03	a	1,30	ghijklmnop	6,47	nopqr	8,23	ijklmn	2,33	opqrst
CP25-VE75	9,33	mnop	1,37	jk	0,54	de	0,77	j	0,67	i	2,13	fghijklmnop	6,20	nopqr	7,80	ijklmn	5,57	hijklmnop
CP25-ZE75	23,93	ghijk	2,37	ijk	0,94	de	17,63	fg	1,13	hi	3,13	cdefghij	21,83	efghij	19,33	ghijkl	2,47	opqrst
SC75-EC25	47,27	de	8,70	fghij	2,12	bcde	4,93	hij	3,00	ghi	4,40	abcde	48,47	ab	22,10	fghi	11,00	cde
SC75-PE25	49,23	d	3,87	hijk	2,77	abcd	4,17	ij	2,93	ghi	1,63	ghijklmnop	20,70	efghijk	14,70	ghijklmn	7,37	defghijk
SC75-PP25	69,50	c	7,97	fghijk	1,49	cde	6,03	hij	4,17	gh	2,27	efghijklmnop	38,50	bc	20,20	ghijk	10,37	cdef
SC75-VE25	91,13	a	12,73	fg	0,50	de	44,50	cd	7,80	f	4,57	abcd	56,17	a	56,97	c	9,93	cdefg
SC75-ZE25	30,60	fghi	36,47	cd	0,78	de	5,20	hij	19,50	bc	0,60	mnop	11,67	jklmnopq	15,60	ghijklmn	2,87	nopqrst
SC50-EC50	22,50	ghijklm	5,57	ghijk	0,99	de	2,03	j	0,83	hi	4,97	abc	32,93	cd	8,17	ijklmn	7,77	defghijk
SC50-PE50	39,27	def	3,27	hijk	1,87	bcde	2,67	j	2,00	ghi	1,17	hijklmnop	13,70	ijklmno	13,50	hijklmn	3,90	jklmnopqrst
SC50-PP50	41,27	def	6,33	ghijk	0,89	de	4,27	ij	2,43	ghi	1,13	ijklmnop	14,70	hijklmno	14,40	ghijklmn	4,07	jklmnopqrst

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
SC50-VE50	71,17	bc	10,30	fgh	0,24	e	69,60	b	5,10	fg	4,87	abc	50,13	a	84,33	a	4,63	ijklmnopqr
SC50-ZE50	15,73	klmnop	52,67	a	0,43	de	4,23	ij	20,93	bc	0,27	nop	4,63	opqr	10,00	ijklmn	0,97	rst
SC25-EC75	15,43	klmnop	4,27	hijk	0,79	de	0,80	j	0,43	i	5,60	ab	30,17	cde	6,90	ijklmn	7,00	efghijklm
SC25-PE75	23,80	ghijkl	4,77	hijk	1,06	de	2,67	j	1,10	hi	0,93	klmnop	6,57	nopqr	15,43	ghijklmn	2,17	opqrst
SC25-PP75	33,20	fgh	5,73	ghijk	0,98	de	3,23	j	1,73	hi	1,60	ghijklmnop	7,40	mnopqr	8,43	ijklmn	3,77	klmnopqrst
SC25-VE75	81,83	abc	8,87	fghi	1,48	cde	90,43	a	3,43	ghi	4,90	abc	33,70	cd	87,90	a	2,80	opqrst
SC25-ZE75	17,07	ijklmnop	45,00	b	0,63	de	3,50	j	21,10	bc	0,20	op	4,73	opqr	9,10	ijklmn	0,50	st

Tabla 43. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
CA100	18,6	de	7,833	def	4,657	a	12,7	c	1,967	d	1,733	def	2,567	f	76,6	a	15,17	a
CP100	8,6	e	2,667	f	0,86	cdef	2,533	c	0,933	d	4,567	ab	12,43	def	37,5	b	11,07	abc
SC100	83,7	a	15	cd	4,07	ab	16,3	c	11,4	bc	2,2	bcdef	24,23	bcd	29,8	bc	13,67	ab
EC100	9,6	e	3,8	f	0,107	f	0,567	c	0,633	d	4,067	abc	13,93	cdef	3,07	c	4,367	defg
PE100	18,3	de	0,667	f	0,223	f	0,2	c	0,5	d	0,233	f	0,933	f	1,63	c	0,833	g
PP100	20,9	de	1,567	f	0,157	f	0,4	c	0,7	d	0,267	f	1,6	f	1,9	c	0,7	g
VE100	78,7	a	5,5	ef	0,78	cdef	63,6	a	3,5	cd	1,967	cdef	13,67	cdef	15	bc	2,9	efg
ZE100	10,4	e	41,27	ab	0,657	def	2,933	c	15,8	ab	0,1	f	1,3	f	1,63	c	0,2	g
CA_EC	12	e	5,544	ef	1,37	cdef	2,122	c	0,778	d	2,844	bcd	11,84	def	23,3	bc	7,056	cde
CA_PE	13,8	e	1,867	f	2,213	bc	1,689	c	0,567	d	0,744	f	2,856	f	25,3	bc	4,522	defg
CA_PP	18,5	de	2,689	f	2,01	bcd	1,289	c	0,611	d	0,678	f	2,533	f	25,1	bc	4,167	defg
CA_VE	41,9	bc	5,889	def	1,307	cdef	37,82	b	1,989	d	1,789	def	8,878	def	75,3	a	8,533	bcd
CA_ZE	12	e	36,17	b	1,16	cdef	4,633	c	18,58	ab	0,567	f	1,733	f	13,6	bc	3,4	efg
CP_EC	10,4	e	2,344	f	0,328	f	2,022	c	0,822	d	3,867	abc	17,34	cde	26,7	bc	8,233	bcd
CP_PE	8,16	e	2,467	f	0,306	f	0,989	c	0,656	d	2,911	bcd	27,02	bc	5,97	c	4,778	cdefg
CP_PP	18	de	17,5	c	1,182	cdef	10,83	c	16,42	ab	1,8	def	11,06	def	12,3	bc	2,744	efg
CP_VE	7,71	e	1,511	f	0,489	ef	0,811	c	0,633	d	2,622	bcde	8,844	def	6,53	c	5,9	cdef
CP_ZE	19	de	2,144	f	0,801	cdef	10,5	c	1,022	d	3	bcd	16,61	cde	16,3	bc	2,6	fg
SC_EC	28,4	cd	6,178	def	1,301	cdef	2,589	c	1,422	d	4,989	a	37,19	ab	12,4	bc	8,589	bcd
SC_PE	37,4	bc	3,967	f	1,901	cde	3,167	c	2,011	d	1,244	ef	13,66	def	14,5	bc	4,478	defg
SC_PP	48	b	6,678	def	1,12	cdef	4,511	c	2,778	d	1,667	def	20,2	cd	14,3	bc	6,067	cdef
SC_VE	81,4	a	10,63	de	0,74	def	68,18	a	5,444	cd	4,778	a	46,67	a	76,4	a	5,789	cdefg
SC_ZE	21,1	de	44,71	a	0,614	def	4,311	c	20,51	a	0,356	f	7,011	ef	11,6	bc	1,444	g

Tabla 44. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
CA100	18,20	hijkl	9,50	klm	2,98	b	9,63	g	1,67	klmno	3,13	hijklmn	5,80	hi	99,87	a	16,97	ab
CP100	9,17	jkl	1,57	stu	0,32	ijklm	1,27	i	0,77	mno	3,00	hijklmn	12,33	fghi	8,13	hijklmn	5,00	ijklmn
SC100	103,30	a	16,70	hi	2,90	b	17,17	f	10,67	g	4,80	ghijklmn	25,63	ef	45,67	cd	17,33	ab
EC100	8,27	jkl	3,93	opqrstu	0,08	m	0,70	i	0,57	no	8,17	cdefghijklmn	17,33	efghi	5,03	klmn	7,03	fghijklmn
PE100	12,73	jkl	0,73	u	0,26	ijklm	0,23	i	0,53	no	1,77	ijklmn	1,83	i	2,13	mn	1,70	lmn
PP100	15,27	ijkl	1,63	stu	0,18	lm	0,33	i	0,93	mno	2,27	hijklmn	2,47	i	2,67	mn	1,27	lmn
VE100	66,80	c	5,43	mnopqrs	0,88	efghijklm	61,70	b	3,47	jk	7,10	defghijklmn	13,63	fghi	30,20	def	5,07	ijklmn
ZE100	10,23	jkl	38,53	d	0,84	efghijklm	3,17	ghi	15,83	f	0,07	n	2,07	i	1,83	n	0,30	n
CA75-EC25	11,60	jkl	4,87	nopqrstu	0,88	efghijklm	2,33	hi	0,83	mno	13,10	abcdefghijkl	12,13	fghi	45,27	cd	15,30	abcd
CA75-PE25	10,90	jkl	3,27	opqrstu	1,06	defghijkl	3,30	ghi	1,10	mno	20,23	abc	3,33	i	43,37	cde	12,17	bdefghi
CA75-PP25	12,13	jkl	2,23	qrstu	1,05	defghijkl	1,57	i	1,50	klmno	18,23	abcde	3,57	i	50,30	c	15,10	abcd
CA75-VE25	28,50	fghi	6,67	mnop	1,81	cd	20,67	ef	2,27	jklmno	12,03	abcdefghijklmn	12,13	fghi	91,67	ab	15,93	abc
CA75-ZE25	12,80	jkl	23,13	g	5,63	a	4,63	ghi	16,20	f	4,20	ghijklmn	4,63	i	23,23	fghij	12,40	bcdefghi
CA50-EC50	7,90	jkl	4,17	opqrstu	0,56	fghijklm	1,33	i	0,77	mno	8,53	cdefghijklmn	11,83	fghi	29,33	defg	10,23	bcdefghijk
CA50-PE50	11,90	jkl	2,17	rstu	1,11	defghijk	1,53	i	0,97	mno	8,53	cdefghijklmn	2,27	i	23,13	fghij	7,60	efghijklmn
CA50-PP50	14,77	ijkl	2,03	rstu	0,96	defghijklm	1,17	i	1,10	mno	9,23	cdefghijklmn	2,10	i	21,57	fghijkl	4,30	jklmn
CA50-VE50	39,07	ef	7,10	lmno	1,06	defghijkl	32,70	d	2,73	jklm	8,73	cdefghijklmn	13,67	fghi	94,47	ab	12,77	abcdefgh
CA50-ZE50	9,97	jkl	27,60	f	2,49	bc	4,27	ghi	15,97	f	1,27	klmn	2,10	i	11,93	ghijklmn	2,90	klmn
CA25-EC75	6,97	kl	3,77	opqrstu	0,23	klm	0,73	i	0,43	o	23,23	ab	16,20	efghi	12,33	fghijklmn	15,67	abcd
CA25-PE75	14,63	ijkl	1,90	stu	0,64	fghijklm	0,80	i	0,90	mno	1,93	hijklmn	2,43	i	11,63	ghijklmn	3,77	klmn
CA25-PP75	14,83	ijkl	1,60	stu	0,45	ghijklm	0,50	i	0,83	mno	2,37	hijklmn	2,80	i	4,97	klmn	1,57	lmn
CA25-VE75	47,80	de	7,30	lmno	1,06	defghijkl	50,63	c	3,30	jkl	6,03	fghijklmn	16,67	efghi	88,53	ab	8,57	cdefghijkl
CA25-ZE75	9,93	jkl	33,30	e	1,67	cde	3,53	ghi	16,47	f	2,30	hijklmn	1,83	i	6,47	jklmn	1,83	lmn
CP75-EC25	5,97	l	1,87	stu	0,25	ijklm	0,87	i	0,67	no	4,60	ghijklmn	64,23	bc	5,73	jklmn	7,03	fghijklmn
CP75-PE25	7,90	jkl	1,13	stu	0,60	fghijklm	0,97	i	0,60	no	2,10	hijklmn	9,77	fghi	8,97	hijklmn	3,47	klmn
CP75-PP25	10,00	jkl	1,80	stu	0,34	ijklm	1,07	i	0,87	mno	1,70	ijklmn	16,47	efghi	11,97	ghijklmn	3,17	klmn
CP75-VE25	9,20	jkl	1,57	stu	0,59	fghijklm	3,80	ghi	1,03	mno	4,90	ghijklmn	22,80	efgh	6,93	ijklmn	5,57	hijklmn
CP75-ZE25	9,67	jkl	22,23	g	1,15	defghij	2,73	hi	22,77	d	1,60	jklmn	10,53	fghi	10,13	hijklmn	2,20	lmn
CP50-EC50	6,33	l	2,53	pqrstu	0,17	lm	0,77	i	0,67	no	10,77	cdefghijklmn	73,77	ab	4,53	lmn	10,10	bcdefghijk
CP50-PE50	9,03	jkl	1,23	stu	0,40	ghijklm	0,77	i	0,60	no	2,57	hijklmn	17,07	efghi	13,67	fghijklmn	4,67	jklmn
CP50-PP50	10,87	jkl	1,80	stu	0,32	ijklm	1,23	i	0,83	mno	1,33	jklmn	11,00	fghi	7,23	ijklmn	3,33	klmn
CP50-VE50	21,27	hij	1,93	stu	0,83	efghijklm	8,50	gh	1,20	mno	3,43	hijklmn	18,37	efghi	11,47	ghijklmn	4,40	jklmn
CP50-ZE50	9,27	jkl	19,93	gh	1,25	defgh	2,67	hi	20,10	e	1,37	jklmn	7,87	ghi	8,03	ijklmn	1,57	lmn

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
CP25-EC75	6,33	l	2,23	qrstu	0,17	lm	0,50	i	0,47	o	13,90	abcdefgh	88,10	a	3,43	mn	11,33	bcdefghij
CP25-PE75	8,00	jkl	0,90	tu	0,40	ghijklm	0,47	i	0,53	no	2,67	hijklmn	7,13	ghi	7,47	ijklmn	3,70	klmn
CP25-PP75	11,50	jkl	1,70	stu	0,27	jklm	0,77	i	0,77	mno	1,47	jklmn	11,50	fghi	7,90	ijklmn	2,77	klmn
CP25-VE75	30,90	fgh	3,17	opqrstu	1,19	defghi	25,17	e	1,67	klmno	6,23	efghijklmn	24,17	efg	22,77	fghijk	5,03	ijklmn
CP25-ZE75	9,77	jkl	30,80	ef	0,72	fghijklm	2,73	hi	28,63	c	0,90	mn	5,57	hi	8,43	hijklmn	1,00	mn
SC75-EC25	35,97	efg	8,87	klmn	0,63	fghijklm	5,33	ghi	3,40	jk	23,93	a	33,43	de	24,60	fghi	20,17	a
SC75-PE25	39,80	ef	4,57	nopqrstu	0,77	efghijklm	4,10	ghi	2,47	jklmn	18,10	abcdef	6,83	ghi	17,67	fghijklmn	14,17	abcdef
SC75-PP25	50,17	de	7,27	lmno	1,00	defghijkl	5,57	ghi	3,90	j	13,40	abcdefghij	13,07	fghi	26,13	efgh	5,53	hijklmn
SC75-VE25	84,93	b	14,73	ij	1,86	cd	46,77	c	8,17	h	13,33	abcdefghijk	50,37	cd	80,13	b	14,67	abcde
SC75-ZE25	22,03	ghij	46,77	c	2,81	b	5,43	ghi	39,23	b	2,40	hijklmn	6,27	hi	13,53	fghijklmn	2,90	klmn
SC50-EC50	16,60	ijkl	6,57	mno	0,19	lm	2,10	hi	1,17	mno	20,17	abc	26,30	ef	12,47	fghijklmn	15,30	abcd
SC50-PE50	37,10	ef	5,13	mno	0,73	fghijklm	3,47	ghi	2,17	jklmno	12,23	abcdefghijklm	9,80	fghi	20,20	fghijklm	8,37	defghijklm
SC50-PP50	36,53	ef	6,37	mno	0,42	ghijklm	4,30	ghi	2,23	jklmno	15,73	abcdefg	14,73	fghi	19,97	fghijklm	8,57	cdefghijkl
SC50-VE50	68,53	c	12,07	jk	1,42	def	65,43	b	6,13	i	13,73	abcdefghi	55,50	c	100,80	a	8,27	defghijklm
SC50-ZE50	19,57	hijkl	54,60	b	1,31	defg	4,30	ghi	46,90	a	1,20	lmn	3,20	i	11,50	ghijklmn	1,40	lmn
SC25-EC75	10,50	jkl	4,70	nopqrstu	0,16	lm	0,93	i	0,80	mno	18,80	abcd	22,60	efgh	9,43	hijklmn	13,20	abcdefg
SC25-PE75	21,23	hij	2,10	rstu	0,36	hijklm	0,83	i	0,63	no	5,00	ghijklmn	9,47	fghi	12,33	fghijklmn	4,20	jklmn
SC25-PP75	21,20	hijk	3,30	opqrstu	0,36	hijklm	1,63	i	1,37	lmno	8,53	cdefghijklmn	6,07	hi	10,37	hijklmn	6,53	ghijklmn
SC25-VE75	57,07	cd	11,40	jkl	0,99	defghijklm	80,57	a	4,13	j	11,60	bcdefghijklmn	52,23	c	97,27	ab	4,63	jklmn
SC25-ZE75	15,60	ijkl	59,53	a	0,85	efghijklm	4,07	ghi	48,27	a	0,30	mn	2,43	i	7,10	ijklmn	0,30	n

Tabla 45. Comparación de las propiedades químicas, la concentración de cationes en la fase intercambiable y micronutrientes disponibles de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Evaluación de la fase soluble e intercambiable de mezclas de sustratos orgánicos y minerales". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
CA100	18,2	ef	9,5	de	3	ab	9,63	cde	1,67	f	3,13	cdef	5,8	ef	99,9	a	17	a
CP100	9,167	ef	1,57	gh	0,3	ef	1,27	e	0,77	f	3	cdef	12,3	def	8,13	cd	5	def
SC100	103,3	a	16,7	d	2,9	ab	17,2	c	10,7	d	4,8	cdef	25,6	cd	45,7	b	17,3	a
EC100	8,267	ef	3,93	efgh	0,1	f	0,7	e	0,57	f	8,17	bcdef	17,3	cde	5,03	cd	7,03	bcdef
PE100	12,73	ef	0,73	h	0,3	ef	0,23	e	0,53	f	1,77	def	1,83	f	2,13	d	1,7	ef
PP100	15,27	ef	1,63	gh	0,2	f	0,33	e	0,93	f	2,27	def	2,47	f	2,67	d	1,27	f
VE100	66,8	b	5,43	efgh	0,9	cdef	61,7	a	3,47	ef	7,1	bcdef	13,6	def	30,2	bc	5,07	def
ZE100	10,23	ef	38,5	b	0,8	cdef	3,17	cde	15,8	c	0,07	f	2,07	f	1,83	d	0,3	f
CA_EC	8,822	ef	4,27	efgh	0,6	def	1,47	e	0,68	f	15	ab	13,4	def	29	bc	13,7	ab
CA_PE	12,48	ef	2,44	fgh	0,9	cdef	1,88	e	0,99	f	10,2	bcd	2,68	f	26	bc	7,84	bcde

SUSTRATO	CIC		Ca		K		Mg		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	cmol _c Kg ⁻¹										mg Kg ⁻¹							
CA_PP	13,91	ef	1,96	gh	0,8	cdef	1,08	e	1,14	f	9,94	bcd	2,82	f	25,6	bc	6,99	cdef
CA_VE	38,46	c	7,02	e	1,3	cde	34,7	b	2,77	f	8,93	bcdef	14,2	de	91,6	a	12,4	abc
CA_ZE	10,9	ef	28	c	3,3	a	4,14	cde	16,2	c	2,59	def	2,86	f	13,9	cd	5,71	def
CP_EC	6,211	f	2,21	gh	0,2	f	0,71	e	0,6	f	9,76	bcde	75,4	a	4,57	d	9,49	abcd
CP_PE	8,311	ef	1,09	h	0,5	def	0,73	e	0,58	f	2,44	def	11,3	ef	10	cd	3,94	def
CP_PP	10,79	ef	1,77	gh	0,3	ef	1,02	e	0,82	f	1,5	ef	13	def	9,03	cd	3,09	ef
CP_VE	20,46	de	2,22	gh	0,9	cdef	12,5	cd	1,3	f	4,86	cdef	21,8	cd	13,7	cd	5	def
CP_ZE	9,567	ef	24,3	c	1	cdef	2,71	de	23,8	b	1,29	f	7,99	ef	8,87	cd	1,59	f
SC_EC	21,02	de	6,71	ef	0,3	ef	2,79	de	1,79	f	21	a	27,4	c	15,5	cd	16,2	a
SC_PE	32,71	cd	3,93	efgh	0,6	def	2,8	de	1,76	f	11,8	bc	8,7	ef	16,7	cd	8,91	abcde
SC_PP	35,97	c	5,64	efg	0,6	def	3,83	cde	2,5	f	12,6	abc	11,3	ef	18,8	cd	6,88	cdef
SC_VE	70,18	b	12,7	d	1,4	cd	64,3	a	6,14	e	12,9	abc	52,7	b	92,7	a	9,19	abcde
SC_ZE	19,07	e	53,6	a	1,7	bc	4,6	cde	44,8	a	1,3	f	3,97	ef	10,7	cd	1,53	f

ANEXO 2. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”

Tabla 46. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación “Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹							
CA100	2,4	a	9,2	a	3,0	j	766,3	a	15,6	bcdefg	52,6	efgh
CP100	0,5	ij	6,5	lmnop	7,5	ghij	65,9	gh	24,2	a	60,1	defgh
SC100	0,5	hij	6,5	lmnop	4,5	ij	62,9	gh	2,1	op	56,4	defgh
EC100	0,6	ghij	7,0	fghijklmn	48,3	a	12,9	h	6,6	hijklmnop	54,7	efgh
PE100	0,4	ij	6,8	ijklmnop	13,5	cdefghij	3,9	h	3,8	lmnop	54,9	efgh
PP100	0,5	hij	7,0	fghijklmn	15,6	cdefghij	6,2	h	3,8	lmnop	74,7	bcdefg
VE100	0,4	ij	6,8	hijklmno	8,7	fghij	2,9	h	5,6	ijklmnop	49,2	gh
ZE100	0,4	ij	6,8	ijklmnop	23,0	bcdef	1,1	h	5,4	ijklmnop	35,7	h
CA75-EC25	0,6	fghij	8,0	bcde	10,0	efghij	81,4	fgh	7,0	hijklmnop	57,8	defgh
CA50-EC50	0,8	defghi	8,0	bcdef	7,0	ghij	122,8	defgh	19,5	ab	53,3	efgh
CA25-EC75	1,1	cde	7,6	bcdefghijk	35,4	ab	209,2	cdef	17,9	abc	67,5	bcdefg

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹							
CA75-PE25	1,8	b	8,6	ab	6,5	hij	507,1	b	12,0	bcdefghijk	61,6	defgh
CA50-PE50	1,2	cd	8,4	ab	5,8	hij	251,0	cd	11,7	bcdefghijkl	63,3	defgh
CA25-PE75	0,7	efghij	7,8	bcdefghi	11,8	cdefghij	98,1	efgh	10,3	cdefghijklmn	59,6	defgh
CA75-PP25	1,0	cdefg	8,6	ab	8,3	ghij	259,0	cd	9,8	defghijklmno	66,6	bcdefg
CA50-PP50	1,0	cdefgh	8,1	bcd	9,0	fghij	183,8	cdefg	5,8	ijklmnop	82,3	bcde
CA25-PP75	0,6	ghij	7,7	bcdefghij	13,4	cdefghij	28,6	h	7,9	ghijklmnop	64,7	cdefgh
CA75-VE25	1,1	cdef	8,3	ab	5,4	hij	226,3	cde	17,2	abcd	53,4	efgh
CA50-VE50	1,3	cd	8,2	abc	13,9	cdefghij	256,0	cd	8,2	fghijklmnop	65,4	cdefgh
CA25-VE75	0,6	ghij	7,8	bcdefgh	6,6	hij	46,7	gh	16,4	abcde	52,9	efgh
CA75-ZE25	0,7	efghij	7,9	bcdefg	25,3	bcd	20,9	h	13,9	bcdefgh	80,2	bcdef
CA50-ZE50	0,5	ghij	7,8	bcdefghi	26,2	bc	4,3	h	10,4	cdefghijklm	61,1	defgh
CA25-ZE75	0,5	ij	7,6	bcdefghij	26,1	bc	2,2	h	9,2	efghijklmnop	47,3	gh
CP75-EC25	0,3	ij	6,5	lmnop	7,6	ghij	20,6	h	16,6	abcde	57,0	defgh
CP50-EC50	0,3	j	5,8	p	15,5	cdefghij	3,3	h	6,4	hijklmnop	53,7	efgh
CP25-EC75	0,3	j	5,8	op	19,4	cdefgh	4,0	h	7,9	ghijklmnop	56,8	defgh
CP75-PE25	0,3	j	6,1	nop	21,3	bcdefg	0,5	h	6,6	hijklmnop	44,2	gh
CP50-PE50	0,3	j	6,4	lmnop	8,7	fghij	19,7	h	5,0	jklmnop	59,2	defgh
CP25-PE75	0,3	ij	6,2	mnop	10,2	efghij	25,8	h	6,1	hijklmnop	65,8	cdefgh
CP75-PP25	0,4	ij	6,6	klmnop	5,6	hij	60,5	gh	8,8	efghijklmnop	73,1	bcdefg
CP50-PP50	1,3	c	6,3	lmnop	11,4	defghij	306,0	c	5,4	ijklmnop	220,7	a
CP25-PP75	1,2	cd	6,6	klmnop	11,3	defghij	250,8	cd	5,8	ijklmnop	215,5	a
CP75-VE25	0,4	ij	6,2	mnop	13,9	cdefghij	46,0	gh	5,3	jklmnop	65,4	cdefgh
CP50-VE50	0,4	ij	6,4	lmnop	8,4	ghij	84,5	fgh	13,4	bcdefghi	62,9	defgh
CP25-VE75	0,5	ghij	6,8	hijklmno	11,7	cdefghij	105,9	efgh	12,8	bcdefghij	61,5	defgh
CP75-ZE25	0,3	j	6,9	ghijklmn	11,3	defghij	13,3	h	10,3	cdefghijklmn	62,2	defgh
CP50-ZE50	2,1	ab	7,3	cdefghijkl	23,6	bcde	656,0	a	16,1	bcdef	97,1	b
CP25-ZE75	0,5	ghij	6,5	lmnop	42,7	a	9,4	h	18,1	abc	94,9	bc
SC75-EC25	0,6	ghij	7,3	cdefghijkl	4,0	ij	64,8	gh	1,9	op	58,5	defgh
SC50-EC50	0,4	ij	7,1	efghijklmn	8,2	ghij	6,7	h	3,5	mnop	56,6	defgh
SC25-EC75	0,5	hij	7,2	cdefghijklm	16,2	cdefghij	10,6	h	4,5	klmnop	61,2	defgh
SC75-PE25	0,5	ghij	7,0	efghijklmn	5,8	hij	55,9	gh	2,5	mnop	58,8	defgh
SC50-PE50	0,4	ij	7,0	efghijklmn	4,4	ij	18,6	h	2,3	nop	56,4	defgh
SC25-PE75	0,4	ij	7,0	efghijklmn	7,1	ghij	16,1	h	2,8	mnop	55,9	efgh
SC75-PP25	0,5	ij	7,1	defghijklmn	3,4	j	38,8	h	1,7	p	59,1	defgh
SC50-PP50	0,4	ij	7,2	cdefghijklm	6,0	hij	19,5	h	2,1	op	60,0	defgh
SC25-PP75	0,6	ghij	7,2	cdefghijklm	6,9	ghij	28,1	h	2,4	mnop	86,5	bcd
SC75-VE25	0,6	ghij	7,1	efghijklmn	5,2	hij	56,4	gh	3,9	lmnop	61,5	defgh
SC50-VE50	0,4	ij	6,9	hijklmn	6,4	hij	19,8	h	4,5	klmnop	54,5	efgh
SC25-VE75	0,4	ij	7,2	cdefghijklm	2,7	j	4,7	h	8,2	fghijklmnop	54,2	efgh

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹								
SC75-ZE25	0,4	ij	7,0	efghijklmn	13,2	cdefghij	4,1	h	5,6	ijklmnop	51,2	fgh	
SC50-ZE50	0,4	ij	6,8	ijklmnop	14,5	cdefghij	1,5	h	4,8	klmnop	48,0	gh	
SC25-ZE75	0,4	ij	6,9	hijklmn	18,1	cdefghi	1,2	h	5,2	ijklmnop	51,6	fgh	

Tabla 47. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL	
	mg L ⁻¹									
CA100	0,19	cd	483,5	a	21,8	def	143,2	abcd	46,0	abc
CP100	0,30	cd	14,6	h	21,1	def	159,2	abc	25,4	klm
SC100	0,00	d	7,5	h	32,1	def	149,7	abcd	34,0	cdefghijklm
EC100	1,16	abcd	2,4	h	82,5	cd	103,9	cdef	49,7	a
PE100	0,16	d	0,4	h	13,1	def	102,0	def	38,0	abcdefgghij
PP100	1,04	bcd	0,8	h	24,1	def	118,7	bcde	40,5	abcdefggh
VE100	0,14	d	0,5	h	2,9	f	101,9	def	41,9	abcdefg
ZE100	0,14	d	0,4	h	8,7	f	99,1	def	36,0	bcdefghijkl
CA75-EC25	0,51	bcd	49,1	fgh	10,2	ef	108,3	bcdef	43,4	abcde
CA50-EC50	0,73	bcd	143,1	cde	16,2	def	112,8	bcdef	42,7	abcdef
CA25-EC75	0,69	bcd	58,4	efgh	195,3	b	130,0	abcd	48,1	ab
CA75-PE25	0,24	cd	374,0	b	31,8	def	136,9	abcd	40,4	abcdefggh
CA50-PE50	0,30	cd	188,9	cd	17,4	def	122,1	bcde	39,0	abcdefgghi
CA25-PE75	0,19	cd	67,0	efgh	8,9	f	111,5	bcdef	39,0	abcdefgghi
CA75-PP25	0,49	bcd	142,8	cde	23,5	def	113,2	bcdef	48,0	ab
CA50-PP50	1,12	abcd	102,8	defg	31,3	def	118,9	bcde	40,9	abcdefg
CA25-PP75	1,33	abcd	34,9	gh	12,0	ef	103,3	cdef	42,3	abcdefg
CA75-VE25	0,32	cd	170,1	cd	19,7	def	124,2	abcde	43,3	abcde
CA50-VE50	0,28	cd	123,7	cdef	193,8	b	127,8	abcde	46,0	abc
CA25-VE75	0,18	d	50,3	fgh	9,1	f	110,2	bcdef	41,5	abcdefg
CA75-ZE25	0,31	cd	31,8	gh	58,8	cdef	118,8	bcde	42,4	abcdefg
CA50-ZE50	0,28	cd	23,5	gh	10,0	f	109,8	bcdef	42,1	abcdefg
CA25-ZE75	0,25	cd	27,2	gh	9,6	f	102,9	cdef	37,4	abcdefghijkl
CP75-EC25	0,30	cd	3,3	h	12,5	def	126,0	abcde	22,7	M
CP50-EC50	0,20	cd	3,1	h	9,6	f	118,1	bcde	44,8	abcd
CP25-EC75	0,25	cd	6,6	h	14,6	def	127,3	abcde	46,1	abc
CP75-PE25	0,45	bcd	1,2	h	7,6	f	119,5	bcde	27,2	ijklm
CP50-PE50	0,24	cd	5,4	h	13,1	def	117,1	bcde	25,0	lm

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL		
	mg L ⁻¹										%
CP25-PE75	0,21	cd	7,2	h	11,8	ef	123,6	bcde	26,5	ijklm	
CP75-PP25	0,31	cd	11,1	h	80,6	cde	57,3	F	27,6	ijklm	
CP50-PP50	0,27	cd	63,5	efgh	217,7	b	180,6	A	30,2	ghijklm	
CP25-PP75	0,29	cd	36,7	gh	243,5	b	131,4	abcd	31,9	efghijklm	
CP75-VE25	0,54	bcd	4,6	h	19,6	def	135,0	abcd	31,0	efghijklm	
CP50-VE50	0,60	bcd	50,8	fgh	23,1	def	132,1	abcd	40,6	abcdefg	
CP25-VE75	0,34	cd	72,2	efgh	51,0	def	132,4	abcd	39,2	abcdefghi	
CP75-ZE25	0,42	cd	12,7	h	8,5	f	121,9	bcde	28,2	hijklm	
CP50-ZE50	0,31	cd	203,9	c	540,2	a	163,0	Ab	30,4	fghijklm	
CP25-ZE75	0,24	cd	12,8	h	122,1	c	72,7	Ef	33,1	defghijklm	
SC75-EC25	1,28	abcd	15,9	h	27,0	def	122,3	bcde	41,2	abcdefg	
SC50-EC50	0,69	bcd	3,2	h	6,9	f	96,8	def	37,8	abcdefghij	
SC25-EC75	1,33	abcd	3,2	h	17,0	def	110,4	bcdef	43,0	abcde	
SC75-PE25	2,60	abcd	6,6	h	32,4	def	137,3	abcd	37,2	bcdefghijkl	
SC50-PE50	1,82	abcd	2,2	h	19,9	def	112,2	bcdef	37,9	abcdefghij	
SC25-PE75	1,23	abcd	1,1	h	9,2	f	103,6	cdef	33,8	cdefghijklm	
SC75-PP25	4,08	a	3,1	h	18,5	def	119,2	bcde	40,6	abcdefg	
SC50-PP50	3,14	abc	1,0	h	11,9	ef	105,4	cdef	36,7	bcdefghijkl	
SC25-PP75	3,38	ab	2,6	h	40,5	def	121,2	bcde	43,2	abcde	
SC75-VE25	1,18	abcd	6,4	h	23,1	def	148,2	abcd	36,8	bcdefghijkl	
SC50-VE50	0,76	bcd	1,4	h	9,2	f	106,3	bcdef	36,2	bcdefghijkl	
SC25-VE75	1,71	abcd	0,2	h	2,6	f	97,5	def	31,9	efghijklm	
SC75-ZE25	0,78	bcd	1,9	h	8,2	f	108,9	bcdef	38,7	abcdefghij	
SC50-ZE50	1,05	bcd	1,1	h	6,9	f	106,9	bcdef	31,4	efghijklm	
SC25-ZE75	0,34	cd	1,3	h	8,7	f	115,8	bcde	35,3	cdefghijkl	

Tabla 48. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca	K	Mg	Na				
	ds m ⁻¹								mg L ⁻¹			
CA100	2,4	a	9,2	a	3,0	d	766,3	a	15,6	ab	52,6	b
CP100	0,5	cd	6,5	efg	7,5	cd	65,9	cde	24,2	a	60,1	b
SC100	0,5	cd	6,5	defg	4,5	d	62,9	cde	2,1	e	56,4	b
EC100	0,6	bcd	7,0	def	48,3	a	12,9	e	6,6	cde	54,7	b
PE100	0,4	cd	6,8	defg	13,5	cd	3,9	e	3,8	de	54,9	b

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹								
PP100	0,5	cd	7,0	def	15,6	bcd	6,2	e	3,8	De	74,7	b	
VE100	0,4	cd	6,8	defg	8,7	cd	2,9	e	5,6	cde	49,2	b	
ZE100	0,4	d	6,8	defg	23,0	bc	1,1	e	5,4	cde	35,7	b	
CA_EC	0,9	bcd	7,9	b	17,5	bc	137,8	bcde	14,8	B	59,5	b	
CA_PE	1,2	b	8,3	b	8,1	cd	285,4	b	11,3	Bc	61,5	b	
CA_PP	0,9	bcd	8,1	b	10,2	cd	157,1	bcde	7,8	bcde	71,2	b	
CA_VE	1,0	bc	8,1	b	8,6	cd	176,4	bcde	13,9	B	57,2	b	
CA_ZE	0,6	cd	7,8	bc	25,8	b	9,1	e	11,2	Bc	62,9	b	
CP_EC	0,3	d	6,1	g	14,1	cd	9,3	e	10,3	bcd	55,8	b	
CP_PE	0,3	d	6,3	fg	13,4	cd	15,3	e	5,9	cde	56,4	b	
CP_PP	1,0	bc	6,5	efg	9,4	cd	205,7	bcd	6,7	cde	169,8	a	
CP_VE	0,5	cd	6,5	efg	11,3	cd	78,8	cde	10,5	bcd	63,2	b	
CP_ZE	1,0	bc	6,9	def	25,9	b	226,2	bc	14,8	B	84,7	b	
SC_EC	0,5	cd	7,2	d	9,5	cd	27,4	de	3,3	E	58,7	b	
SC_PE	0,5	cd	7,0	de	5,8	d	30,2	de	2,5	E	57,0	b	
SC_PP	0,5	cd	7,2	cd	5,4	d	28,8	de	2,1	E	68,5	b	
SC_VE	0,4	cd	7,1	de	4,8	d	27,0	de	5,5	cde	56,7	b	
SC_ZE	0,4	d	6,9	def	15,3	bcd	2,3	e	5,2	De	50,3	b	

Tabla 49. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los siete (7) días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL	
	mg L ⁻¹									
CA100	0,19	c	483,5	a	21,8	c	143,2	a	54,0	cd
CP100	0,30	c	14,6	cde	21,1	c	159,2	a	74,6	a
SC100	0,00	c	7,5	cde	32,1	bc	149,7	a	66,0	abc
EC100	1,16	bc	2,4	e	82,5	abc	103,9	a	50,3	d
PE100	0,16	c	0,4	e	13,1	c	102,0	a	62,0	bcd
PP100	1,04	bc	0,8	e	24,1	c	118,7	a	59,5	cd
VE100	0,14	c	0,5	e	2,9	c	101,9	a	58,1	cd
ZE100	0,14	c	0,4	e	8,7	c	99,1	a	64,0	abcd
CA_EC	0,64	bc	83,5	cde	73,9	bc	117,0	a	55,3	cd
CA_PE	0,24	c	210,0	b	19,4	c	123,5	a	60,5	cd
CA_PP	0,98	bc	93,5	cd	22,3	c	111,8	a	56,3	cd
CA_VE	0,26	c	114,7	c	74,2	bc	120,7	a	56,4	cd

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL	
	mg L ⁻¹								%	
CA_ZE	0,28	c	27,5	cde	26,1	c	110,5	a	59,4	cd
CP_EC	0,25	c	4,3	e	12,2	c	123,8	a	62,1	bcd
CP_PE	0,30	c	4,6	e	10,9	c	120,1	a	73,8	a
CP_PP	0,29	c	37,1	cde	180,6	ab	123,1	a	70,1	ab
CP_VE	0,49	bc	42,5	cde	31,2	c	133,2	a	63,0	abcd
CP_ZE	0,32	c	76,5	cde	223,6	a	119,2	a	69,4	ab
SC_EC	1,10	bc	7,4	de	17,0	c	109,8	a	59,3	cd
SC_PE	1,88	b	3,3	e	20,5	c	117,7	a	63,7	abcd
SC_PP	3,53	a	2,3	e	23,6	c	115,3	a	59,8	cd
SC_VE	1,22	bc	2,7	e	11,6	c	117,3	a	65,0	abc
SC_ZE	0,72	bc	1,4	e	7,9	c	110,6	a	64,9	abc

Tabla 50. Comparación de la CE, pH y concentración de los cationes evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	CE ds m ⁻¹	pH		Ca	K	Mg		Na				
				mg L ⁻¹								
CA100	0,6	bcd	7,7	abcdefghijklmno	11,3	ghijklmnop	17,5	cde	14,5	bcde	60,2	bcdefghij
CP100	0,2	d	6,7	klm	7,6	ijklmnopq	24	cde	4,5	ijklmno	61,4	bcdefghi
SC100	0,4	bcd	7,1	cdefghijkl	5,6	lmnopq	20,2	cde	2,6	no	60,4	bcdefghij
EC100	0,5	bcd	7,3	bcdefghijkl	18,0	bcdefghi	6,53	cde	3,3	lmno	60,5	bcdefghi
PE100	0,4	bcd	7,3	bcdefghijkl	10,8	ijklmnopq	3,43	de	3,4	lmno	57,7	bcdefghij
PP100	0,5	bcd	7,5	abcdefghijkl	14,9	bcdefghijk	6,07	cde	4,0	klmno	66,6	abcdef
VE100	0,5	bcd	7,9	abcde	4,3	nopq	6,7	cde	13,5	bcdef	59,2	bcdefghij
ZE100	0,4	bcd	7,3	bcdefghijkl	20,3	bcdef	1,6	e	5,5	ijklmno	36,2	k
CA75-EC25	0,5	bcd	7,7	abcdefgh	12,1	efghijklmno	25,4	cde	8,4	efghijklmn	62,3	bcdefghi
CA50-EC50	0,6	bcd	7,8	abcdef	15,6	bcdefghij	34,9	cde	10,6	defghij	65,9	bcdefg
CA25-EC75	0,6	bcd	7,6	abcdefghijkl	19,5	bcdefgh	36,6	cde	9,2	defghijklm	63,5	bcdefghi
CA75-PE25	1,4	a	8,4	a	6,6	klmnopq	336	b	17,9	abc	72,1	ab
CA50-PE50	1,4	a	8,3	a	6,1	lmnopq	494	a	15,3	abcd	81,1	a
CA25-PE75	0,6	bcd	7,9	abcde	12,7	efghijklmn	59,4	cde	10,3	defghijk	62,2	bcdefghi
CA75-PP25	0,7	bc	8,1	ab	13,1	defghijklm	101	cde	14,1	bcde	68,2	abcde
CA50-PP50	0,7	bc	7,9	abcde	11,7	fghijklmnop	95,9	cde	8,0	efghijklmno	72,3	ab
CA25-PP75	0,5	bcd	7,6	abcdefghijkl	13,8	cdefghijkl	17,3	cde	7,4	fghijklmno	61,5	bcdefghi
CA75-VE25	0,8	b	8,0	abc	6,1	lmnopq	115	c	14,2	bcde	63,7	bcdefghi
CA50-VE50	0,6	bcd	7,9	abcd	5,6	lmnopq	58,3	cde	15,0	bcd	60,8	bcdefghi
CA25-VE75	0,5	bcd	7,6	bcdefghi	5,6	lmnopq	21,7	cde	11,3	defghi	59,1	bcdefghij
CA75-ZE25	0,6	bcd	7,9	abcde	21,6	bcd	13	cde	13,1	bcdefg	70,5	abc

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na	
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹							
CA50-ZE50	0,5	bcd	7,6	abcdefghijkl	22,6	b	3,27	de	9,7	defghijkl	62,4	bcdefghi
CA25-ZE75	0,4	bcd	7,6	abcdefghijkl	19,7	bcdefg	2,3	de	7,4	fghijklmno	51,7	ghij
CP75-EC25	0,5	bcd	7,5	abcdefghijkl	20,7	bcde	60,3	cde	12,1	cdefgh	67,0	abcdef
CP50-EC50	0,4	bcd	7,3	bcdefghijkl	22,3	bc	14,1	cde	7,0	fghijklmno	65,9	bcdefg
CP25-EC75	0,4	bcd	7,4	abcdefghijkl	31,8	a	39,4	cde	8,3	efghijklmn	69,0	abcd
CP75-PE25	0,4	bcd	6,7	ijklm	11,0	hijklmnopq	113	cd	13,4	bcdef	63,7	bcdefghi
CP50-PE50	0,3	cd	6,5	klm	8,9	jklmnopq	32,5	cde	4,8	ijklmno	61,1	bcdefghi
CP25-PE75	0,4	bcd	6,5	klm	10,7	ijklmnopq	32,7	cde	5,7	ijklmno	63,0	bcdefghi
CP75-PP25	0,3	cd	6,7	ijklm	9,1	jklmnopq	18	cde	4,8	jklmno	62,7	bcdefghi
CP50-PP50	0,3	cd	6,5	klm	10,1	ijklmnopq	24,3	cde	5,7	ijklmno	66,2	bcdefg
CP25-PP75	0,3	cd	7,7	abcdefg	12,0	fghijklmnop	17,1	cde	4,7	jklmno	69,3	abcd
CP75-VE25	0,5	bcd	6,7	ijklm	9,9	ijklmnopq	99,6	cde	19,0	ab	61,9	bcdefghi
CP50-VE50	0,5	bcd	6,7	ijklm	7,5	jklmnopq	61,6	cde	21,6	a	62,5	bcdefghi
CP25-VE75	0,3	cd	7,1	cdefghijkl	7,5	jklmnopq	20,9	cde	15,3	abcd	59,1	bcdefghij
CP75-ZE25	0,3	cd	6,1	m	15,4	bcdefghij	3,8	de	5,8	ijklmno	53,1	fghij
CP50-ZE50	0,3	cd	6,1	m	18,1	bcdefghi	4,3	cde	6,6	ghijklmno	57,9	bcdefghij
CP25-ZE75	0,3	cd	6,4	lm	21,5	bcd	1,17	e	6,5	ijklmno	45,8	jk
SC75-EC25	0,4	bcd	7,2	bcdefghijkl	3,8	opq	20,5	cde	1,5	o	61,4	bcdefghi
SC50-EC50	0,4	bcd	7,1	cdefghijkl	9,1	jklmnopq	3,53	de	3,8	lmno	56,1	cdefghij
SC25-EC75	0,4	bcd	7,2	bcdefghijkl	12,9	efghijklmn	4,1	cde	3,6	lmno	59,4	bcdefghij
SC75-PE25	0,4	bcd	7,0	defghijklm	4,0	opq	39,2	cde	2,3	no	55,2	defghij
SC50-PE50	0,4	bcd	6,8	ghijklm	4,9	mnpq	4,17	cde	2,9	mno	59,7	bcdefghij
SC25-PE75	0,4	bcd	7,0	defghijklm	6,4	klmnopq	3,87	de	3,0	mno	59,3	bcdefghij
SC75-PP25	0,4	bcd	7,0	defghijklm	3,7	opq	19,6	cde	1,6	o	60,9	bcdefghi
SC50-PP50	0,4	bcd	7,1	cdefghijkl	4,6	mnpq	9,73	cde	1,9	no	63,9	bcdefghi
SC25-PP75	0,4	bcd	7,1	defghijkl	7,5	jklmnopq	10	cde	2,7	mno	64,6	bcdefgh
SC75-VE25	0,5	bcd	6,9	efghijklm	3,5	pq	35,5	cde	2,8	mno	54,0	efghij
SC50-VE50	0,4	bcd	7,0	defghijklm	3,8	opq	17,1	cde	3,5	lmno	60,6	bcdefghi
SC25-VE75	0,4	bcd	7,7	abcdefg	2,7	q	5,7	cde	7,0	fghijklmno	56,0	cdefghij
SC25-ZE75	0,4	bcd	7,2	bcdefghijkl	15,4	bcdefghij	1,73	de	5,1	ijklmno	50,2	hijk
SC50-ZE50	0,4	bcd	6,9	fghijklm	12,8	efghijklmn	1,77	de	4,7	jklmno	49,6	ijk
SC75-ZE25	0,4	bcd	7,0	defghijklm	10,3	ijklmnopq	2,7	de	5,2	ijklmno	51,7	ghij

Tabla 51. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	NO ₃	PO ₄	SO ₄	Cl	FL
----------	-----------------	-----------------	-----------------	----	----

	mg L ⁻¹								%	
CA100	0,04	gh	18,4	cd	1,5	i	89,8	f	39,0	abcde
CP100	0,16	bcde	3,0	d	15,2	cdefghi	108,2	bcdef	23,0	defg
SC100	0,02	h	1,6	d	2,3	i	98,4	ef	37,6	abcdefg
EC100	0,07	cdefgh	3,2	d	12,7	defghi	100,9	ef	43,6	ab
PE100	0,03	h	0,5	d	2,3	hi	94,0	f	31,3	abcdefg
PP100	0,05	defgh	1,7	d	19,0	bcdefgh	110,2	abcdef	36,8	abcdefg
VE100	0,05	efgh	0,5	d	2,0	i	103,4	def	37,7	abcdefg
ZE100	0,08	bcdefgh	0,4	d	1,2	i	100,7	ef	35,0	abcdefg
CA75-EC25	0,07	cdefgh	19,4	cd	5,1	ghi	102,3	def	39,2	abcde
CA50-EC50	0,05	efgh	56,5	cd	9,4	efghi	105,4	cdef	40,8	abc
CA25-EC75	0,04	fgh	34,8	cd	28,2	bcd	111,3	abcdef	40,9	abc
CA75-PE25	0,11	bcdefgh	204,1	b	19,7	bcdefg	107,3	bcdef	38,3	abcdef
CA50-PE50	0,06	defgh	329,0	a	5,2	ghi	138,3	abcde	34,4	abcdefg
CA25-PE75	0,05	efgh	40,3	cd	8,0	fghi	108,7	bcdef	30,0	abcdefg
CA75-PP25	0,03	h	50,7	cd	5,7	ghi	110,6	abcdef	38,2	abcdef
CA50-PP50	0,12	bcdefgh	50,2	cd	14,1	cdefghi	113,8	abcdef	35,7	abcdefg
CA25-PP75	0,11	bcdefgh	19,3	cd	5,4	ghi	102,0	def	36,0	abcdefg
CA75-VE25	0,36	a	93,2	c	5,5	ghi	111,9	abcdef	38,1	abcdef
CA50-VE50	0,12	bcdefgh	59,0	cd	3,6	ghi	105,1	cdef	35,8	abcdefg
CA25-VE75	0,03	h	19,5	cd	5,7	ghi	108,2	bcdef	31,2	abcdefg
CA75-ZE25	0,15	bcdefg	43,7	cd	9,8	efghi	111,4	abcdef	39,9	abcd
CA50-ZE50	0,03	h	36,6	cd	2,8	hi	102,8	def	38,5	abcdef
CA25-ZE75	0,15	bcdef	14,6	d	2,2	i	103,8	def	33,3	abcdefg
CP75-EC25	0,10	bcdefgh	7,8	d	30,2	bc	143,7	abcd	24,4	cdefg
CP50-EC50	0,05	efgh	1,4	d	8,7	fghi	112,7	abcdef	34,7	abcdefg
CP25-EC75	0,03	h	2,4	d	53,6	a	123,5	abcdef	46,3	a
CP75-PE25	0,16	bcd	21,3	cd	25,5	bcde	146,9	abc	20,4	g
CP50-PE50	0,06	defgh	2,5	d	6,6	ghi	111,3	abcdef	22,2	efg
CP25-PE75	0,15	bcdefg	2,8	d	9,5	efghi	124,8	abcdef	21,3	fg
CP75-PP25	0,08	cdefgh	3,7	d	8,2	fghi	118,4	abcdef	35,1	abcdefg
CP50-PP50	0,12	bcdefgh	5,0	d	14,1	cdefghi	117,2	abcdef	24,2	cdefg
CP25-PP75	0,05	efgh	2,3	d	13,4	defghi	111,3	abcdef	29,5	abcdefg
CP75-VE25	0,06	defgh	22,7	cd	23,5	bcdef	151,0	a	28,5	bcdefg
CP50-VE50	0,06	defgh	9,9	d	14,3	cdefghi	148,1	ab	29,8	abcdefg
CP25-VE75	0,18	bc	2,4	d	5,5	ghi	114,8	abcdef	30,5	abcdefg
CP75-ZE25	0,05	efgh	2,7	d	4,9	ghi	107,0	bcdef	20,5	g
CP50-ZE50	0,12	bcdefgh	3,0	d	8,5	fghi	113,6	abcdef	23,9	cdefg
CP25-ZE75	0,02	h	1,0	d	2,8	hi	105,0	cdef	26,4	bcdefg
SC75-EC25	0,09	bcdefgh	8,4	d	8,9	efghi	105,0	cdef	32,7	abcdefg
SC50-EC50	0,06	defgh	2,9	d	6,7	ghi	102,5	def	35,5	abcdefg

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL	
	mg L ⁻¹									
SC25-EC75	0,05	defgh	2,8	d	7,9	fghi	105,0	cdef	30,0	abcdefg
SC75-PE25	0,07	cdefgh	1,8	d	33,2	b	109,1	abcdef	36,3	abcdefg
SC50-PE50	0,04	gh	1,1	d	3,1	ghi	102,1	def	32,8	abcdefg
SC25-PE75	0,07	cdefgh	1,0	d	31,9	b	104,0	def	29,8	abcdefg
SC75-PP25	0,11	bcdefgh	1,5	d	12,0	defghi	108,3	bcdef	33,7	abcdefg
SC50-PP50	0,05	defgh	1,0	d	8,2	fghi	103,4	def	34,3	abcdefg
SC25-PP75	0,04	fgh	0,8	d	8,4	fghi	104,4	def	37,1	abcdefg
SC75-VE25	0,19	b	2,8	d	12,4	defghi	126,5	abcdef	35,0	abcdefg
SC50-VE50	0,07	cdefgh	1,1	d	3,6	ghi	105,1	cdef	32,3	abcdefg
SC25-VE75	0,03	h	0,3	d	2,2	i	98,0	ef	29,2	abcdefg
SC25-ZE75	0,15	bcdef	1,1	d	6,8	ghi	113,3	abcdef	32,5	abcdefg
SC50-ZE50	0,07	cdefgh	1,1	d	5,5	ghi	107,1	bcdef	28,8	bcdefg
SC75-ZE25	0,06	defgh	1,4	d	1,7	i	106,8	bcdef	31,2	abcdefg

Tabla 52. Comparación de la CE, pH y concentración de cationes en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K	Mg		Na		
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹							
CA100	0,6	bcd	7,7	abc	11,3	cdef	17,5	b	14,5	abc	60,2	bcd
CP100	0,2	d	6,7	def	7,6	efg	24,0	b	4,5	fgh	61,4	bcd
SC100	0,4	bcd	7,1	bcde	5,6	fg	20,2	b	2,6	h	60,4	bcd
EC100	0,5	bcd	7,3	bcde	18,0	bcd	6,5	b	3,3	gh	60,5	bcd
PE100	0,4	bcd	7,3	bcde	10,8	cdefg	3,4	b	3,4	gh	57,7	cd
PP100	0,5	bcd	7,5	abcd	14,9	cde	6,1	b	4,0	gh	66,6	abc
VE100	0,5	bcd	7,9	ab	4,3	fg	6,7	b	13,5	bcd	59,2	bcd
ZE100	0,4	bcd	7,3	bcde	20,3	abc	1,6	b	5,5	efgh	36,2	e
CA_EC	0,6	bc	7,7	abc	15,7	cd	32,3	b	9,4	cdef	63,9	abc
CA_PE	1,1	a	8,2	a	8,4	efg	296,4	a	14,5	ab	71,8	a
CA_PP	0,6	b	7,9	ab	12,9	cde	71,3	b	9,8	cde	67,3	ab
CA_VE	0,6	b	7,9	ab	5,8	fg	64,9	b	13,5	bc	61,2	bcd
CA_ZE	0,5	bcd	7,7	abc	21,3	ab	6,2	b	10,1	bcde	61,5	bc
CP_EC	0,4	bcd	7,4	bcd	24,9	a	37,9	b	9,2	cdef	67,3	ab
CP_PE	0,4	bcd	6,6	ef	10,2	defg	59,3	b	8,0	defg	62,6	bc
CP_PP	0,3	cd	7,0	cde	10,4	defg	19,8	b	5,0	fgh	66,0	abc
CP_VE	0,4	bcd	6,9	de	8,3	efg	60,7	b	18,6	a	61,2	bcd

SUSTRATO	CE		pH		Ca		K		Mg		Na		
	ds m ⁻¹				mg L ⁻¹								
CP_ZE	0,3	d	6,2	f	18,3	bc	3,1	b	6,3	efgh	52,3	d	
SC_EC	0,4	bcd	7,2	bcde	8,6	efg	9,4	b	2,9	h	59,0	bcd	
SC_PE	0,4	bcd	6,9	cde	5,1	fg	15,7	b	2,7	h	58,1	cd	
SC_PP	0,4	bcd	7,1	cde	5,3	fg	13,1	b	2,1	h	63,1	abc	
SC_VE	0,4	bcd	7,2	bcde	3,3	g	19,4	b	4,4	gh	56,9	cd	
SC_ZE	0,4	bcd	7,0	cde	12,8	cde	2,1	b	5,0	fgh	50,5	d	

Tabla 53. Comparación de la concentración de aniones en los lixiviados de los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) y su fracción lixiviada (FL), evaluados a los 24 días después de siembra en la investigación "Composición química del lixiviado de mezclas de materiales orgánicos y minerales usados como sustratos". Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Valores de los sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	NO ₃		PO ₄		SO ₄		Cl		FL		
	mg L ⁻¹										%
CA100	0,04	b	18,4	b	1,5	c	89,8	c	39,0	ab	
CP100	0,16	ab	3,0	b	15,2	abc	108,2	bc	23,0	cd	
SC100	0,02	b	1,6	b	2,3	c	98,4	bc	37,6	ab	
EC100	0,07	ab	3,2	b	12,7	bc	100,9	bc	43,6	a	
PE100	0,03	b	0,5	b	2,3	c	94,0	bc	31,3	abcd	
PP100	0,05	b	1,7	b	19,0	abc	110,2	abc	36,8	abc	
VE100	0,05	b	0,5	b	2,0	c	103,4	bc	37,7	ab	
ZE100	0,08	ab	0,4	b	1,2	c	100,7	bc	35,0	abcd	
CA_EC	0,05	b	36,9	b	14,2	bc	106,4	bc	40,3	a	
CA_PE	0,07	ab	191,1	a	11,0	bc	118,1	abc	34,2	abcd	
CA_PP	0,09	ab	40,0	b	8,4	bc	108,8	bc	36,6	abc	
CA_VE	0,17	a	57,2	b	4,9	c	108,4	bc	35,1	abc	
CA_ZE	0,11	ab	31,6	b	4,9	c	106,0	bc	37,2	ab	
CP_EC	0,06	b	3,9	b	30,8	a	126,6	ab	35,1	abc	
CP_PE	0,12	ab	8,9	b	13,9	bc	127,6	ab	21,3	d	
CP_PP	0,08	ab	3,7	b	11,9	bc	115,7	abc	29,6	bcd	
CP_VE	0,10	ab	11,7	b	14,5	bc	138,0	a	29,6	bcd	
CP_ZE	0,06	b	2,2	b	5,4	c	108,5	bc	23,6	cd	
SC_EC	0,07	ab	4,7	b	7,8	bc	104,2	bc	32,7	abcd	
SC_PE	0,06	b	1,3	b	22,7	ab	105,1	bc	33,0	abcd	
SC_PP	0,07	ab	1,1	b	9,5	bc	105,4	bc	35,0	abc	
SC_VE	0,10	ab	1,4	b	6,0	c	109,9	bc	32,2	abcd	
SC_ZE	0,09	ab	1,2	b	4,6	c	109,1	bc	30,9	abcd	

ANEXO 3. Resultados de la comparación de los tratamientos evaluados en el estudio “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”

Tabla 54. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y raíz (Pf. Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Sustratos con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	Pf Aérea		Pf Raíz	
	g			
CA100	5,4	klmnopqrstu	4,5	pqrs
CP100	6,0	efghijklmnopqrs	5,3	nopqr
SC100	7,0	abcdefghi	6,7	fghijklm
EC100	5,5	klmnopqrstu	5,5	lmnopq
PE100	5,8	ghijklmnopqrstu	7,5	cdefghi
PP100	4,3	uvw	3,3	st
VE100	6,2	cdefghijklmnopqr	8,4	abcd
ZE100	3,8	wx	5,4	mnopqr
CA75-EC25	6,3	cdefghijklmnopq	4,5	pqrs
CA75-PE25	3,8	wx	5,0	opqr
CA75-PP25	5,3	mnopqrstuv	6,4	hijklmno
CA75-VE25	6,7	abcdefghijklm	6,6	ghijklmn
CA75-ZE25	5,9	fghijklmnopqrs	6,3	hijklmno
CA50-EC50	7,2	abcdef	2,9	t
CA50-PE50	6,6	abcdefghijklmno	9,2	ab
CA50-PP50	6,8	abcdefghijkl	4,4	qrs
CA50-VE50	6,5	abcdefghijklmnop	6,3	ijklmno
CA50-ZE50	6,3	cdefghijklmnopq	3,4	st
CA25-EC75	7,4	abcde	5,9	jklmno
CA25-PE75	6,1	defghijklmnopqr	7,1	defghij
CA25-PP75	6,7	abcdefghijklmn	4,2	qrst
CA25-VE75	6,9	abcdefghij	5,3	nopqr
CA25-ZE75	7,2	abcdefg	8,2	bcde
CP75-EC25	5,2	nopqrstuvwxyz	3,3	st
CP75-PE25	5,3	mnopqrstuvwxyz	6,0	jklmno
CP75-PP25	7,8	ab	5,4	lmnopq
CP75-VE25	6,2	cdefghijklmnopqr	6,3	hijklmno
CP75-ZE25	6,8	abcdefghijk	6,9	efghijk
CP50-EC50	7,6	abc	6,5	ghijklmn

SUSTRATO	Pf Aérea		Pf Raíz	
	g			
CP50-PE50	5,7	ijklmnopqrstu	7,8	cdefg
CP50-PP50	6,0	efghijklmnopqrs	5,8	ijklmnop
CP50-VE50	4,8	rstuvw	4,5	pqrs
CP50-ZE50	5,3	lmnopqrstu	6,1	ijklmno
CP25-EC75	5,7	hijklmnopqrstu	5,5	lmnopq
CP25-PE75	5,8	fghijklmnopqrst	5,6	klmnopq
CP25-PP75	6,4	bcdefghijklmnop	7,6	cdefghi
CP25-VE75	5,0	pqrstuvw	5,3	mnopqr
CP25-ZE75	4,9	qrstuvw	4,1	rst
SC75-EC25	7,5	abcd	6,8	fghijkl
SC75-PE25	3,7	x	7,5	cdefghi
SC75-PP25	3,9	vwx	7,1	defghij
SC75-VE25	5,2	opqrstuvwxyz	6,7	fghijkl
SC75-ZE25	5,9	fghijklmnopqrs	7,1	defghij
SC50-EC50	7,2	abcdefgh	7,1	defghij
SC50-PE50	4,6	stuvw	7,6	cdefgh
SC50-PP50	5,6	ijklmnopqrstu	8,8	abc
SC50-VE50	4,6	stuvw	9,6	a
SC50-ZE50	6,9	abcdefghij	6,0	ijklmno
SC25-EC75	6,8	abcdefghijk	6,9	efghij
SC25-PE75	4,4	tuvw	8,2	bcde
SC25-PP75	7,9	a	8,0	bcdef
SC25-VE75	5,0	pqrstuvw	7,0	efghij
SC25-ZE75	6,4	bcdefghijklmnop	7,0	efghij

Tabla 55. Ganancia de peso fresco de brotes (Pf. Aérea) y raíz (Pf. Raíz) de esquejes de clavel sembrados en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico-material mineral) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos de sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), demás datos son medias de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	Pf Aérea		Pf Raíz	
	g			
CA100	5,40	bcd	4,50	bc
CP100	6,00	abcd	5,30	bc
SC100	7,03	ab	6,67	abc
EC100	5,50	bcd	5,53	abc
PE100	5,77	abcd	7,53	ab
PP100	4,33	cd	3,30	c

SUSTRATO	Pf Aérea		Pf Raíz	
	g			
VE100	6,17	abcd	8,37	a
ZE100	3,83	d	5,37	bc
CA_EC	6,97	ab	4,44	c
CA_PE	5,50	bcd	7,10	ab
CA_PP	6,24	abc	4,99	bc
CA_VE	6,70	ab	6,06	abc
CA_ZE	6,46	ab	5,98	abc
CP_EC	6,18	abc	5,10	bc
CP_PE	5,60	bcd	6,44	abc
CP_PP	6,72	ab	6,28	abc
CP_VE	5,34	bcd	5,38	bc
CP_ZE	5,70	bcd	5,69	abc
SC_EC	7,17	a	6,92	ab
SC_PE	4,21	d	7,80	a
SC_PP	5,80	abcd	7,98	a
SC_VE	4,92	cd	7,79	a
SC_ZE	6,39	ab	6,70	ab

Tabla 56. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico - material mineral - proporción) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones (n=3).

SUSTRATO	N		P		K		Ca		Mg		S		Na	
	%													
CA100	1,8	defgh	0,3	abcdef	1,95	abcde	0,583	abcd	0,273	cdefgh	0,123	abc	0,243	cdefg
CP100	2,4	a	0,273	abcdef	1,93	abcdef	0,597	abcd	0,217	gh	0,137	abc	0,317	abcd
SC100	1,99	bcdefg	0,26	abcdef	2,2	ab	0,503	abcd	0,2	gh	0,13	abc	0,24	cdefg
EC100	1,76	fgh	0,26	abcdef	1,7	bcdef	0,613	abcd	0,213	gh	0,14	abc	0,24	cdefg
PE100	1,78	efgh	0,237	cdef	1,79	abcdef	0,493	abcd	0,183	gh	0,123	abc	0,187	fg
PP100	1,94	bcdefgh	0,247	cdef	1,89	abcdef	0,53	abcd	0,177	gh	0,123	abc	0,223	defg
VE100	1,91	bcdefgh	0,253	bcdef	2,02	abcd	0,497	abcd	0,39	abc	0,13	abc	0,243	cdefg
ZE100	1,67	gh	0,21	f	1,59	cdef	0,56	abcd	0,19	gh	0,11	c	0,187	fg
CA75-EC25	1,9	bcdefgh	0,34	ab	2,01	abcde	0,717	a	0,273	cdefgh	0,127	abc	0,22	defg
CA75-PE25	1,99	bcdefg	0,3	abcdef	1,9	abcdef	0,607	abcd	0,35	abcdef	0,13	abc	0,273	abcdefg
CA75-PP25	1,89	bcdefgh	0,327	abc	1,99	abcde	0,68	abc	0,243	efgh	0,133	abc	0,22	defg
CA75-VE25	1,98	bcdefgh	0,327	abc	2,1	abcd	0,647	abcd	0,26	defgh	0,12	abc	0,227	cdefg
CA75-ZE25	1,96	bcdefgh	0,26	abcdef	1,8	abcdef	0,567	abcd	0,213	gh	0,12	abc	0,21	defg
CA50-EC50	1,89	bcdefgh	0,277	abcdef	1,66	bcdef	0,623	abcd	0,223	gh	0,133	abc	0,253	bcdefg

SUSTRATO	N		P		K		Ca		Mg		S		Na	
	%													
CA50-PE50	2,04	abcdefg	0,28	abcdef	1,97	abcde	0,52	abcd	0,36	abcde	0,133	abc	0,247	cdefg
CA50-PP50	1,98	bcdefgh	0,267	abcdef	2,01	abcde	0,557	abcd	0,213	gh	0,127	abc	0,187	fg
CA50-VE50	2,15	abcde	0,347	a	2,32	a	0,7	ab	0,277	cdefgh	0,15	ab	0,277	abcdefg
CA50-ZE50	2,06	abcdef	0,293	abcdef	2	abcde	0,6	abcd	0,223	gh	0,143	abc	0,247	cdefg
CA25-EC75	1,91	bcdefgh	0,253	bcdef	1,7	bcdef	0,61	abcd	0,217	gh	0,12	abc	0,21	defg
CA25-PE75	1,91	bcdefgh	0,257	abcdef	1,86	abcdef	0,52	abcd	0,36	abcde	0,13	abc	0,227	cdefg
CA25-PP75	2,03	abcdefg	0,303	abcde	1,96	abcde	0,56	abcd	0,2	gh	0,13	abc	0,22	defg
CA25-VE75	1,93	bcdefgh	0,277	abcdef	1,84	abcdef	0,577	abcd	0,223	gh	0,123	abc	0,24	cdefg
CA25-ZE75	2,05	abcdefg	0,313	abcd	2,01	abcde	0,68	abc	0,21	gh	0,15	ab	0,223	defg
CP75-EC25	2,14	abcdef	0,233	def	1,81	abcdef	0,583	abcd	0,197	gh	0,13	abc	0,24	cdefg
CP75-PE25	2,07	abcdef	0,257	abcdef	1,94	abcdef	0,527	abcd	0,36	abcde	0,137	abc	0,293	abcdef
CP75-PP25	2,21	ab	0,243	cdef	1,77	abcdef	0,56	abcd	0,207	gh	0,133	abc	0,36	ab
CP75-VE25	2	bcdefg	0,24	cdef	1,69	bcdef	0,473	bcd	0,183	gh	0,113	bc	0,253	bcdefg
CP75-ZE25	2,08	abcdef	0,237	cdef	1,7	bcdef	0,517	abcd	0,18	gh	0,127	abc	0,27	abcdefg
CP50-EC50	2,13	abcdef	0,237	cdef	2,02	abcd	0,643	abcd	0,233	fgh	0,127	abc	0,253	bcdefg
CP50-PE50	1,83	bcdefgh	0,23	def	1,58	def	0,447	d	0,377	abcd	0,117	abc	0,287	abcdef
CP50-PP50	2	bcdefg	0,233	def	1,72	bcdef	0,577	abcd	0,223	gh	0,123	abc	0,373	a
CP50-VE50	1,99	bcdefg	0,23	def	1,61	bcdef	0,507	abcd	0,187	gh	0,127	abc	0,273	abcdefg
CP50-ZE50	1,81	cdefgh	0,217	ef	1,34	f	0,463	cd	0,16	h	0,12	abc	0,27	abcdefg
CP25-EC75	2,08	abcdef	0,227	def	1,66	bcdef	0,587	abcd	0,187	gh	0,127	abc	0,257	bcdefg
CP25-PE75	1,95	bcdefgh	0,253	bcdef	1,75	abcdef	0,473	bcd	0,4	ab	0,127	abc	0,297	abcde
CP25-PP75	2,01	bcdefg	0,227	def	1,62	bcdef	0,513	abcd	0,19	gh	0,117	abc	0,333	abc
CP25-VE75	1,89	bcdefgh	0,22	ef	1,6	bcdef	0,487	bcd	0,177	gh	0,117	abc	0,273	abcdefg
CP25-ZE75	1,59	h	0,213	ef	1,42	ef	0,48	bcd	0,167	gh	0,11	c	0,253	bcdefg
SC75-EC25	2,16	abcde	0,263	abcdef	1,97	abcde	0,567	abcd	0,283	bcdefg	0,14	abc	0,217	defg
SC75-PE25	2,18	abcd	0,267	abcdef	2,18	abc	0,5	abcd	0,277	cdefgh	0,153	a	0,227	cdefg
SC75-PP25	1,94	bcdefgh	0,223	def	1,66	bcdef	0,437	d	0,187	gh	0,113	bc	0,233	cdefg
SC75-VE25	2,01	bcdefg	0,237	cdef	1,96	abcde	0,523	abcd	0,217	gh	0,127	abc	0,24	cdefg
SC75-ZE25	2,01	bcdefg	0,263	abcdef	1,84	abcdef	0,57	abcd	0,227	gh	0,123	abc	0,217	defg
SC50-EC50	2,14	abcdef	0,253	bcdef	2,02	abcd	0,653	abcd	0,22	gh	0,123	abc	0,19	efg
SC50-PE50	1,96	bcdefgh	0,23	def	1,74	abcdef	0,487	bcd	0,247	efgh	0,123	abc	0,187	fg
SC50-PP50	1,98	bcdefg	0,23	def	1,66	bcdef	0,577	abcd	0,203	gh	0,13	abc	0,223	defg
SC50-VE50	2,09	abcdef	0,247	cdef	1,74	abcdef	0,517	abcd	0,197	gh	0,137	abc	0,233	cdefg
SC50-ZE50	1,96	bcdefgh	0,27	abcdef	1,72	bcdef	0,593	abcd	0,22	gh	0,143	abc	0,22	defg
SC25-EC75	2,19	abc	0,253	bcdef	1,79	abcdef	0,533	abcd	0,197	gh	0,133	abc	0,173	g
SC25-PE75	2,02	abcdefg	0,24	cdef	1,74	abcdef	0,487	bcd	0,447	a	0,123	abc	0,197	efg
SC25-PP75	1,92	bcdefgh	0,223	def	1,9	abcdef	0,557	abcd	0,213	gh	0,123	abc	0,24	cdefg
SC25-VE75	2	bcdefg	0,233	def	1,84	abcdef	0,487	bcd	0,197	gh	0,123	abc	0,207	efg
SC25-ZE75	1,97	bcdefgh	0,247	cdef	1,76	abcdef	0,543	abcd	0,17	gh	0,15	ab	0,233	cdefg

Tabla 57. Comparación de la concentración de elementos mayores y Na en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico – material mineral) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	N		P		K		Ca		Mg		S		Na	
	%													
CA100	1,8	de	0,3	ab	1,95	abc	0,583	abcd	0,273	abc	0,123	a	0,243	bcde
CP100	2,4	a	0,273	abc	1,93	abc	0,597	abcd	0,217	c	0,137	a	0,317	ab
SC100	1,99	bcde	0,26	bc	2,2	a	0,503	cd	0,2	c	0,13	a	0,24	bcde
EC100	1,76	de	0,26	abc	1,7	bc	0,613	abcd	0,213	c	0,14	a	0,24	bcde
PE100	1,78	de	0,237	bc	1,79	abc	0,493	cd	0,183	c	0,123	a	0,187	e
PP100	1,94	bcde	0,247	bc	1,89	abc	0,53	abcd	0,177	c	0,123	a	0,223	cde
VE100	1,91	bcde	0,253	bc	2,02	ab	0,497	cd	0,39	a	0,13	a	0,243	bcde
ZE100	1,67	e	0,21	c	1,59	bc	0,56	abcd	0,19	c	0,11	a	0,187	e
CA_EC	2,02	bcd	0,289	ab	1,94	abc	0,616	abc	0,216	c	0,138	a	0,227	cde
CA_PE	2,02	bcd	0,317	a	2,09	a	0,641	ab	0,253	bc	0,131	a	0,248	bcde
CA_PP	1,97	bcde	0,299	ab	1,99	ab	0,599	abcd	0,219	c	0,13	a	0,209	de
CA_VE	1,98	bcde	0,279	ab	1,91	abc	0,549	abcd	0,357	a	0,131	a	0,249	bcd
CA_ZE	1,9	cde	0,29	ab	1,79	abc	0,65	a	0,238	c	0,127	a	0,228	cde
CP_EC	1,83	de	0,222	c	1,49	c	0,487	d	0,169	c	0,119	a	0,264	bc
CP_PE	1,96	bcde	0,23	bc	1,63	bc	0,489	d	0,182	c	0,119	a	0,267	bc
CP_PP	2,07	bc	0,234	bc	1,7	bc	0,55	abcd	0,207	c	0,124	a	0,356	a
CP_VE	1,95	bcde	0,247	bc	1,76	abc	0,482	d	0,379	a	0,127	a	0,292	b
CP_ZE	2,11	abc	0,232	bc	1,83	abc	0,604	abcd	0,206	c	0,128	a	0,25	bcd
SC_EC	1,98	bcde	0,26	bc	1,77	abc	0,569	abcd	0,206	c	0,139	a	0,223	cde
SC_PE	2,03	bcd	0,239	bc	1,85	abc	0,509	cd	0,203	c	0,129	a	0,227	cde
SC_PP	1,95	bcde	0,226	c	1,74	abc	0,523	bcd	0,201	c	0,122	a	0,232	cde
SC_VE	2,05	bc	0,246	bc	1,89	abc	0,491	d	0,323	ab	0,133	a	0,203	de
SC_ZE	2,16	ab	0,257	bc	1,93	abc	0,584	abcd	0,233	c	0,132	a	0,193	e

Tabla 58. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (material orgánico-material mineral-proporción) evaluados en la investigación “Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos”. Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Datos son medias de tres observaciones ($n=3$).

SUSTRATO	Fe		Mn		Cu		Zn		B	
	mg Kg ⁻¹									
CA100	0,06	nopq	249	a	3,73	mnop	52,4	fghijklmno	53,4	ijklmnopq

SUSTRATO	Fe		Mn		Cu		Zn		B	
	%		mg Kg ⁻¹							
CP100	0,17	abc	160	cdefghijkl	7,33	abcdef	44,9	ijklmno	34,1	opqr
SC100	0,06	nopq	118	hijklmnop	3	op	73,4	bcdefghijk	83,6	efghi
EC100	0,1567	bcde	120	ghijklmnop	4,7	hijklmnop	68,2	cdefghijklmn	64,7	ghijklmno
PE100	0,0833	klmnopq	120	ghijklmnop	2,57	p	92,4	abcd	90,7	cdefgh
PP100	0,0533	opq	118	ghijklmnop	4,37	jklmnop	39,9	mno	23,5	qr
VE100	0,0933	hijklmnopq	93,7	op	3,3	nop	63,4	defghijklmno	102	cde
ZE100	0,13	bcdefghijk	92,7	p	4,57	ijklmnop	104	ab	135	ab
CA75-EC25	0,06	nopq	160	cdefghijkl	4,6	hijklmnop	99,3	abc	43,2	mnopqr
CA75-PE25	0,06	nopq	161	bcdefghijk	5,5	defghijklmn	110	a	85,2	efgh
CA75-PP25	0,05	pq	166	bcdefghij	4,8	hijklmnop	67,5	cdefghijklmn	68,2	ghijklmn
CA75-VE25	0,05	pq	168	bcdefghi	4,53	ijklmnop	66,1	defghijklmno	99,6	cdef
CA75-ZE25	0,0633	nopq	169	bcdefghi	4,17	klmnop	59,9	efghijklmno	67,2	ghijklmn
CA50-EC50	0,0767	lmnopq	171	bcdefghi	4,77	hijklmnop	83	abcdef	69,2	fghijklmn
CA50-PE50	0,09	hijklmnopq	173	bcdefghi	5,2	efghijklmno	46,4	ijklmno	24,6	qr
CA50-PP50	0,07	mnopq	173	bcdefghi	4,9	ghijklmno	77,1	bcdefgh	39,3	mnopqr
CA50-VE50	0,0433	q	175	bcdefgh	4,9	ghijklmno	52,3	fghijklmno	25,7	qr
CA50-ZE50	0,1033	fghijklmno	176	bcdefg	5,73	cdefghijklm	81,2	abcdefg	89,7	defgh
CA25-EC75	0,0767	lmnopq	180	bcdef	4,97	ghijklmno	76,3	bcdefghi	66,1	ghijklmn
CA25-PE75	0,0833	klmnopq	186	bcde	5,27	efghijklmno	92,9	abcd	104	cde
CA25-PP75	0,08	klmnopq	210	abcd	4,87	ijklmno	83,7	abcdef	77,5	efghijk
CA25-VE75	0,08	klmnopq	213	abc	5,23	efghijklmno	61,7	defghijklmno	46,5	lmnopqr
CA25-ZE75	0,07	mnopq	218	ab	5,7	cdefghijklm	98,7	abc	119	abcd
CP75-EC25	0,1367	bcdefghi	122	ghijklmnop	6,77	bcdefghi	61,5	defghijklmno	78,2	efghij
CP75-PE25	0,13	bcdefghijk	122	ghijklmnop	8,03	ab	70,8	cdefghijklm	140	a
CP75-PP25	0,12	cdefghijklm	126	fghijklmnop	6,13	bcdefghijkl	75,1	bcdefghijk	107	bcde
CP75-VE25	0,0867	ijklmnopq	129	efghijklmnop	7,43	abcde	52,9	fghijklmno	69,7	fghijklm
CP75-ZE25	0,1167	defghijklm	129	efghijklmnop	7,37	abcde	53,6	fghijklmno	46,7	klmnopqr
CP50-EC50	0,11	efghijklmn	131	efghijklmnop	7,3	abcdef	71,3	cdefghijklm	88,2	defgh
CP50-PE50	0,1633	abcd	132	efghijklmnop	7,77	abcd	70,7	cdefghijklm	88,1	defgh
CP50-PP50	0,1333	bcdefghij	137	efghijklmnop	6,4	bcdefghijk	76,1	bcdefghij	76,8	efghijkl
CP50-VE50	0,1267	cdefghijkl	137	efghijklmnop	6,87	bcdefgh	39,8	mno	33,3	pqr
CP50-ZE50	0,1467	bcdefg	138	efghijklmnop	7,97	abc	52	fghijklmno	42,4	mnopqr
CP25-EC75	0,13	bcdefghijk	150	efghijklmnop	6,6	bcdefghij	70,4	cdefghijklmn	80,3	efghij
CP25-PE75	0,1533	bcdef	151	efghijklmno	6,8	bcdefghi	56,3	fghijklmno	82,7	efghi
CP25-PP75	0,1233	cdefghijkl	152	defghijklmn	7,17	abcdefg	72,2	cdefghijkl	94,2	cdefg
CP25-VE75	0,1067	efghijklmn	154	defghijklm	9,37	a	63,9	defghijklmno	63,2	hijklmnop
CP25-ZE75	0,14	bcdefgh	154	defghijklm	7,33	abcdef	76,5	bcdefghi	79,8	efghij
SC75-EC25	0,13	bcdefghijk	94,3	nop	4,63	hijklmnop	62,2	defghijklmno	66,5	ghijklmn
SC75-PE25	0,1033	fghijklmno	95,8	mnop	4,9	ghijklmno	48,9	ijklmno	24,6	qr

SUSTRATO	Fe		Mn		Cu		Zn		B	
	%		mg Kg ⁻¹							
SC75-PP25	0,1	ghijklmnop	96,2	mnop	4,1	lmnop	55,5	fghijklmno	38,8	nopqr
SC75-VE25	0,08	klmnopq	97,6	mnop	5,23	efghijklmno	98,7	abc	121	abc
SC75-ZE25	0,0867	ijklmnopq	99,3	mnop	4,87	hijklmno	44,5	jklmno	24,6	qr
SC50-EC50	0,1233	cdefghijkl	101	mnop	4,47	jklmnop	74,6	bcdefghijk	78	efghij
SC50-PE50	0,13	bcdefghijk	102	lmnop	4,47	jklmnop	34,5	o	25,9	qr
SC50-PP50	0,11	efghijklmn	103	lmnop	4,4	jklmnop	53,9	fghijklmno	23,9	qr
SC50-VE50	0,12	cdefghijklm	103	lmnop	4,93	ghijklmno	41	lmno	23,7	qr
SC50-ZE50	0,1367	bcdefghi	104	klmnop	5,2	efghijklmno	89,9	abcde	104	cde
SC25-EC75	0,1067	efghijklmn	107	klmnop	5,07	fghijklmno	50,8	ghijklmno	31,9	qr
SC25-PE75	0,2133	a	108	jklmnop	4,87	hijklmno	76,2	bcdefghij	50,4	jklmnopqr
SC25-PP75	0,08	klmnopq	115	ijklmnop	5,53	defghijklmn	38,6	no	21,1	r
SC25-VE75	0,18	ab	117	hijklmnop	4,7	hijklmnop	45,9	hijklmno	25,9	qr
SC25-ZE75	0,1367	bcdefghi	117	hijklmnop	5,63	defghijklm	44,2	klmno	26,4	qr

Tabla 59. Comparación de la concentración de elementos menores en el tejido vegetal de esquejes de clavel, como respuesta a su propagación en los sustratos (sin tener en cuenta la proporción: material orgánico - material mineral) evaluados en la investigación "Composición nutricional y respuesta de esquejes de *Dianthus caryophyllus* propagados en mezclas de sustratos". Materiales con la misma letra no presentaron diferencias significativas (Tuckey $P < 0,05$). Sustratos control son medias de tres observaciones ($n=3$), los demás son media de nueve observaciones ($n=9$).

SUSTRATO	Fe		Mn		Cu		Zn		B	
	%		mg Kg ⁻¹							
CA100	0,06	de	137	cdef	3,73	defg	52,4	bc	53,4	cde
CP100	0,17	a	249	a	7,33	ab	44,9	c	34,1	cde
SC100	0,06	de	99,3	f	3	fg	73,4	abc	83,6	abcde
EC100	0,1567	ab	103	f	4,7	defg	68,2	abc	64,7	bcde
PE100	0,0833	bcde	107	f	2,57	g	92,4	ab	90,7	abcd
PP100	0,0533	e	92,7	f	4,37	defg	39,9	c	23,5	e
VE100	0,0933	bcde	160	cde	3,3	efg	63,4	abc	102	abc
ZE100	0,13	abc	96,2	f	4,57	defg	104	a	135	a
CA_EC	0,0789	cde	126	ef	5,2	d	79,9	ab	91,9	abc
CA_PE	0,0578	e	147	cde	4,89	de	60	bc	57,2	cde
CA_PP	0,0667	de	148	cde	4,86	de	76,1	abc	61,7	bcde
CA_VE	0,0778	cde	125	ef	5,32	cd	83	ab	71,2	bcde
CA_ZE	0,0711	cde	135	def	4,78	def	86,2	ab	59,5	cde
CP_EC	0,1344	ab	167	cd	7,56	ab	60,7	bc	56,3	cde
CP_PE	0,1067	bcd	180	bc	7,89	a	52,2	bc	55,4	cde
CP_PP	0,1256	abc	179	bc	6,57	bc	74,5	abc	92,6	abc
CP_VE	0,1489	ab	166	cd	7,53	ab	65,9	abc	103	ab

SUSTRATO	Fe		Mn		Cu		Zn		B	
	%		mg Kg ⁻¹							
CP_ZE	0,1256	abc	201	b	6,89	ab	67,7	abc	82,3	abcde
SC_EC	0,12	abc	106	f	5,23	d	59,5	bc	51,6	cde
SC_PE	0,1267	abc	103	f	4,96	de	61,9	bc	56,8	cde
SC_PP	0,0967	bcde	98	f	4,68	defg	49,3	c	27,9	e
SC_VE	0,1489	ab	110	f	4,74	def	53,2	bc	33,6	de
SC_ZE	0,12	abc	126	ef	4,72	def	62,5	bc	58,8	cde