



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# Evaluación del efecto de dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de un cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth.)

Joan Sebastián Gutiérrez Díaz

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2017

# Evaluación del efecto de dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de un cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth.)

Joan Sebastián Gutiérrez Díaz

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ciencias Agrarias

Director (a):

Ph.D. Martha Marina Bolaños Benavides

Codirector (a):

M.Sc. Carmen Rosa Bonilla Correa

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2017



*A mi amada esposa Dayana,  
a mis padres, a mi hermana y a Ezequiel,  
ellos son mi eterna fuente de fortaleza y mi  
mayor motivación para vivir cada día. Vamos por  
más...*

*Joan Sebastián Gutiérrez Díaz*

## Agradecimientos

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

A mi directora de tesis, Investigadora Ph.D. de Corpoica, la doctora Martha Marina Bolaños Benavides por su apoyo y sobre todo por su comprensión e inmensa calidad humana.

A mi codirectora de tesis, la profesora Carmen Rosa Bonilla Correa por su invaluable ayuda y valiosa guía durante todo el trabajo.

A la Corporación Colombiana de Investigación agropecuaria CORPOICA, Centro de Investigación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca), por el financiamiento de la presente investigación, la cual hace parte del proyecto: Requerimientos nutricionales (N, P, K y Ca) del cultivo de mora (*Rubus glaucus* B.), determinados y manejo eficiente de la fertilización integrada.

Al grupo de Profesionales de Apoyo a la Investigación de Corpoica William, Oscar y Diana por su apoyo en campo y en la formulación de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia porque siempre será mi amada alma máter.

A la profesora Yolanda Rubiano Sanabria porque nunca se apartó de mi lado y porque siempre tuvo para mí un buen consejo.

Al profesor Aquiles Enrique Darghan Contreras por su ayuda y su siempre buena disposición para apoyar técnica y científicamente la formulación y el desarrollo de esta investigación

A todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera para el logro de este meta en mi vida.



## Resumen

El cultivo de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) en Colombia ha mostrado un crecimiento sólido en producción y área sembrada, como consecuencia de su demanda en el mercado interno y su potencial para exportación. Se evidencia la poca información acerca de fertilización de suelo en este sistema productivo. El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de distintas dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora, tomando en cuenta las características del suelo y la dependencia espacial de las variables consideradas, haciendo uso de herramientas de análisis espacial y multivariante. Los datos analizados provienen de un ensayo experimental que se estableció en el municipio de Sylvania, departamento de Cundinamarca, en un diseño en bloques completos al azar con 25 tratamientos, tres bloques y 75 unidades experimentales. Luego de 481 días después trasplante, se tomó una muestra de suelo de cada unidad experimental georreferenciada para análisis de propiedades químicas y se registró la productividad promedio en gramos de mora por planta. El ACP global sirvió para encontrar similitudes globales mientras que el ACP ponderado geográficamente fue de gran utilidad para encontrar diferencias locales entre las variables estudiadas. El efecto de las dosis evaluadas se evidenció solamente en la productividad del cultivo, las propiedades químicas del suelo no se vieron afectadas por la aplicación de diferentes dosis de N, P, K y Ca. La dependencia espacial entre unidades experimentales influyó en el efecto de los tratamientos y que adicionalmente las características de suelo en cada bloque influyeron en el desempeño de los tratamientos evaluados con relación a productividad del cultivo. La estrategia de fertilización más adecuada para el cultivo de mora en etapa productiva en suelos de la zona de estudio, debe considerar aspectos como la mineralogía de arcillas del suelo (específicamente, el contenido de minerales amorfos y de arcillas 2:1 y 2:1:1) y el pH, para ajustar las cantidades de N, P, K y Ca que requiere el cultivo y obtener mayor producción de frutos por planta.

**Palabras clave:** Dependencia espacial, fertilización de cultivos, análisis multivariante.

## Abstract

The Andean blackberry crop in Colombia has shown solid growth in production and area sown, as a result of its demand in the domestic market and its potential for export. The lack of information about soil fertilization in this productive system is evidenced. The objective of this study was to analyze the effect of different doses of N, P, K and Ca on soil chemical properties and productivity of Andean blackberry crop (*Rubus glaucus* Benth.), taking into account soil characteristics and dependence spatial analysis of variables considered, making use of spatial and multivariate analysis tools. The data analyzed came from an experimental plot that was established in the Sylvania, Cundinamarca, in a complete block design with 25 treatments, three blocks and 75 experimental units. After 481 days of transplanting, a soil sample was taken from each georeferenced experimental unit for analysis of chemical properties and the average productivity in grams of blackberry per plant was registered. The global PCA served to find global similarities while PCA geographically weighted was very useful to find local differences between the variables studied. The effect of the evaluated doses was evidenced only in crop productivity, the chemical properties of the soil were not affected by the application of different doses of N, P, K and Ca. The spatial dependence between experimental units influenced the effect of the treatments, additionally the characteristics of soil in each experimental block influenced in the performance of the treatments evaluated in relation to crop productivity. The most suitable fertilization strategy for the Andean blackberry crop in the soil of the study area should consider aspects such as soil clay mineralogy (specifically, the content of amorphous minerals and 2: 1 and 2:1: 1 clays) and pH, to adjust the amounts of N, P, K and Ca required for crop and to obtain higher fruit yield per plant.

**Keywords:** Spatial dependence, crop fertilization, multivariate analysis.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>12</b>
<b>Lista de anexos</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>14</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>3. Revisión de literatura</b> .....	<b>17</b>
<b>4. Materiales y métodos</b> .....	<b>28</b>
4.1 Localización del área de estudio.....	28
4.2 Diseño experimental .....	28
4.3 Descripción de suelos de la zona de estudio .....	28
4.4 Muestreo de suelos para determinación de propiedades químicas y registro de productividad del cultivo .....	30
4.5 Interrelación de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo ..	32
4.5.1 Análisis descriptivo univariable.....	32
4.5.2 Análisis descriptivo multivariable .....	32
4.6 Efecto de las dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo.....	33
4.6.1 Análisis espacial de datos .....	33
4.6.2 Análisis no espacial de datos .....	34
<b>5. Resultados y discusión</b> .....	<b>35</b>
5.1 Descripción de suelos de la zona de estudio .....	35
5.2 Interrelación de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo ..	43
5.2.1 Análisis descriptivo univariable.....	43
5.2.2 Análisis descriptivo multivariable .....	44
5.3 Efecto de las dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo.....	54
5.3.1 Análisis espacial de datos .....	54
5.3.2 Análisis no espacial de datos .....	64
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>70</b>
<b>7. Anexos</b> .....	<b>72</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>89</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Muestra de suelos para análisis micromorfológico, tomada del horizonte Ap del perfil BL2, en el lote experimental del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca.....	29
<b>Figura 2.</b> Ubicación de los puntos de muestreo en cada unidad experimental del lote de cultivo de mora de Castilla ( <i>R. glaucus</i> Benth.) Cuadrados. Bloque experimental 1. Triángulos. Bloque experimental 2. Círculos. Bloque experimental 3. ....	30
<b>Figura 3.</b> Imágenes de secciones delgadas de perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote experimental del cultivo de mora. a) Horizonte 0-11 cm BL1 PPL. b) Horizonte 0-11 cm BL1 XPL. c) Horizonte 11-48 cm BL1 PPL. d) Horizonte 11-48 cm BL1 XPL. e) Horizonte 48-78 cm BL1 PPL. f) Horizonte 48-78 cm BL1 XPL. g) Horizonte 0-27 cm BL2 PPL. h) Horizonte 0-27 cm BL2 XPL. i) Horizonte 0-32 cm BL3 PPL. j) Horizonte 0-32 cm BL3 XPL.....	42
<b>Figura 4.</b> Correlación entre las variables de suelo y los dos primeros componentes extraídos a partir de las propiedades químicas de suelo y la productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth). ....	47
<b>Figura 5.</b> Rangos de puntuaciones en cada componente principal extraído a partir de las propiedades químicas de suelo y la productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth) en Silvania, Cundinamarca. a) Primer componente. b) Segundo componente. c) Tercer componente. ....	48
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de variación total acumulada en los dos primeros componentes ponderados geográficamente para cada uno de los puntos georreferenciados en el lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	49
<b>Figura 7.</b> Variables con mayor carga en cada punto georreferenciado para los primeros tres componentes ponderados geográficamente, extraídos a partir de las propiedades químicas de suelo y productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth) en Silvania, Cundinamarca. a) Primer componente. b) Segundo componente. c) Tercer componente. ....	52
<b>Figura 8.</b> Dispersogramas de variables que presentaron tendencia espacial de acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo en el cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	57

---

<b>Figura 9.</b> Promedios por tratamientos y bloques de los residuales del modelo de tendencia de superficie para la variable productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Sylvania, Cundinamarca. ....	59
<b>Figura 10.</b> Biplot para los factores del diseño experimental en el cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Sylvania, Cundinamarca. Superior. Factor Tratamiento. Inferior. Factor Bloque. ....	65
<b>Figura 11.</b> Relación entre las propiedades químicas de suelo incluídas en el ASCA y los dos primeros componentes extraídos a partir del factor experimental bloque en el cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth), en Sylvania, Cundinamarca.....	66

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros medidos por cada unidad experimental en el cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth) en el municipio de Silvania, Cundinamarca.....	30
<b>Tabla 2.</b> Propiedades químicas de los horizontes del perfil BL2 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	36
<b>Tabla 3.</b> Mineralogía de la fracción arenosa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca.....	37
<b>Tabla 4.</b> Mineralogía de arenas de la fracción liviana y densa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	38
<b>Tabla 5.</b> Mineralogía de la fracción arcillosa del suelo del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	39
<b>Tabla 6.</b> Resumen del análisis de componentes principales global extraído de las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth) en Silvania, Cundinamarca.....	44
<b>Tabla 10.</b> Tratamientos por bloque con mayor y menor productividad y las correspondientes cantidades aplicadas de cada nutriente en el cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	60
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de variación explicada por cada componente extraído según la fuente de variación considerada en el diseño experimental del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	64

## Lista de anexos

<b>Anexo A.</b> Dosis de N, P, K y Ca de cada tratamiento aplicado en el cultivo experimental de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	72
<b>Anexo B.</b> Descripción general del perfil BL2, ubicado en el bloque 2 del cultivo experimental de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	73
<b>Anexo C.</b> Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL1 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	75
<b>Anexo D.</b> Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL2 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	76
<b>Anexo E.</b> Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL3 del lote de cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	77
<b>Anexo F.</b> Estadística descriptiva de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en el municipio de Silvania, Cundinamarca. ....	79
<b>Anexo G.</b> Medidas de significancia y de ajuste de modelos de regresión local de tendencia de superficie para cada variable procesada. ....	80
<b>Anexo H.</b> Resultados de análisis de varianza con las variables originales y con los residuales de los modelos de tendencia de superficie. ....	80
<b>Anexo I.</b> Resultados de análisis de varianza multivariante y univariante para las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.). ....	80
<b>Anexo J.</b> Comparación de medias por Tukey de los diferentes análisis de varianza realizados sobre los datos de productividad del cultivo de mora ( <i>R. glaucus</i> Benth.) en Silvania, Cundinamarca. ....	85
<b>Anexo K.</b> Productividad promedio de mora (g/planta) por tratamiento y bloque del cultivo experimental en Silvania, Cundinamarca. ....	86
<b>Anexo L.</b> Valores promedio por tratamiento de las propiedades químicas de suelo del cultivo de mora ( <i>Rubus glaucus</i> Benth.). ....	88

## 1. Introducción

En el año 2012 los principales países productores de mora fueron Irán (182.000 t), Vietnam (150.000 t), México (139.803 t), Papúa Nueva Guinea (106.500 t) e Italia (83.000 t). Para este mismo año, los principales países importadores fueron Estados Unidos (404.595 t), Canadá (240.613 t), Reino Unido (111.055 t), Alemania (74.844 t) y Francia (68.839 t) (CCB, 2015).

En América, la mora se produce desde México hasta Ecuador, siendo ampliamente cultivada en Colombia y Costa Rica (Carrillo *et al.*, 2015). En Colombia se cultiva a nivel comercial la especie *Rubus glaucus* o mora de Castilla, principalmente en la zona Andina y las estribaciones de la cordillera Occidental, específicamente en los departamentos de Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Valle del Cauca, Caldas, Quindío, Risaralda, Antioquia, Cundinamarca y los Santanderes (Franco *et al.*, 1996). La mora, al igual que otros frutales de clima frío moderado, es un cultivo importante para los agricultores por su capacidad de producir ingresos, ser fuente de empleo rural y constituirse en una alternativa agrícola rentable frente a otros cultivos; sin embargo, es notable la necesidad de desarrollar productos y procesos tecnológicos, tanto en la producción como para el manejo poscosecha (García, 2001).

Según información de la Cámara de Comercio de Bogotá (2015), para el año 2013 en Colombia se produjeron más de 100.000 t de mora, siendo Cundinamarca el principal departamento productor con 25.000 t, seguido de Santander con 21.000 t, Antioquia con 15.000 t, Huila con 7.000 t y Caldas con 6.000 t. En 2015, los departamentos que más contribuyeron a la producción de mora fueron Santander, Cundinamarca y Nariño con

19.238, 18.060 y 6.958 t, respectivamente. La mayor área sembrada y cosechada fue reportada en el departamento de Santander, mientras que con relación a la producción por hectárea, los mayores rendimientos fueron reportados en el departamento de Risaralda (DANE, 2015).

En el país ha sido creciente la producción de mora y del área sembrada, llegando a ser considerada como una fruta con potencial tanto para abastecimiento del mercado interno como para la exportación (Grijalba *et al.*, 2010). Diferentes investigaciones acerca del cultivo de mora en Colombia muestran que esta actividad es realizada por pequeños y medianos agricultores y en muchas regiones constituye una de las principales fuentes de ingresos, generación de empleo rural, oferta de alimento y de agroindustria (Barrero, 2009). Según la apuesta exportadora agropecuaria, publicada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en el año 2006, para el año 2020, se espera un área sembrada de más de 18.000 ha y más de 190.000 t de mora cosechada en Colombia.

Pese a la importancia de la especie en el país, los resultados de investigación con relación a nutrición y fertilización del cultivo aún son incipientes, lo que origina desconocimiento con relación a requerimientos nutricionales y al efecto de la aplicación de fertilizantes sobre las características del suelo y el rendimiento de este cultivo. Por tanto, se evidencia la necesidad de profundizar en investigaciones que conduzcan a minimizar las limitaciones mencionadas.

Dentro de este contexto, es necesario establecer las condiciones edáficas bajo las cuales el cultivo expresa su mayor potencial productivo, lo cual permitirá aplicar los insumos adecuados, en el sitio preciso y en las cantidades requeridas, según las condiciones particulares de los agroecosistemas (Leiva, 2003; Muñoz *et al.*, 2006). Este manejo se constituye en una alternativa para una gestión apropiada del sistema productivo, que permita aprovechar mejor los recursos existentes y administrar correctamente los insumos en el tiempo y en el espacio (Bongiovanni, 2004) e incrementar la productividad de los cultivos (Zhang *et al.*, 2002).

## 2. Objetivos

### Objetivo general

Establecer el efecto de distintas dosis de N, P, K, y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad de un cultivo de mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth.) ubicado en el municipio de Sylvania, Cundinamarca, relacionando su dependencia conjunta y su correlación espacial y tomando como referencia las características del suelo donde se encuentra establecido el sistema productivo.

### Objetivos específicos

- Estudiar características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas del suelo donde se encuentra establecido el cultivo experimental de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.), que sirvan de base para soportar los resultados obtenidos del procesamiento de la información.
- Analizar la interrelación espacial de propiedades químicas de suelo y productividad del cultivo de mora de Castilla (*R. glaucus* Benth.) mediante el análisis de componentes principales ponderados geográficamente.
- Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora de Castilla (*R. glaucus* Benth.) evaluadas en conjunto.



### 3.Revisión de literatura

#### **El cultivo de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.)**

La especie *R. glaucus* Benth., pertenece a la familia de las rosáceas, es originaria del trópico americano, más específicamente de los países de Ecuador y México; el primer reporte del género *Rubus* fue realizado por el botánico inglés George Bentham entre los años 1839 a 1857 (Morales y Villegas, 2012). Del género *Rubus*, en Colombia se cultiva comercialmente la especie *Rubus glaucus* o mora de Castilla. Dentro de las moras cultivadas existen variedades e híbridos con y sin espinas; no obstante, el uso de híbridos es muy limitado ya que todavía no han llenado las expectativas productivas y económicas de los productores (Sora *et al.*, 2006).

Lobo (2006) citado por Barrero (2009), plantea que el potencial aumento de productividad de la mora y otros frutales andinos en Colombia está determinado por factores como la aceptación por parte de consumidores locales y de otras regiones del mundo y por supuesto, por la presencia de nichos ecológicos con condiciones ambientales y de suelo favorables para el desarrollo del cultivo (Morales y Villegas, 2012). La mora se adapta a una amplia gama de condiciones edáficas, siempre y cuando esté provista de adecuado drenaje y altos contenidos de materia orgánica. El cultivo se desarrolla mejor en terrenos ligeramente ácidos, con un pH entre 5,2 y 6,7, considerándose el más apropiado aquél cercano a 5,7 (CCI, 1999; CCI, 2001). Según Escoto (1994), la mora admite suelos ácidos, pero profundos y exige nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio para su buen desarrollo y producción. De acuerdo a Martínez (2007) la mora se desarrolla adecuadamente en suelos arenosos con alto contenido de materia orgánica, fósforo y potasio. Ciertamente, los reportes sobre condiciones de suelo adecuadas para el desarrollo del cultivo carecen de la precisión favorable para los productores, situación relacionada no solo con las escasas investigaciones sobre este tema sino principalmente, con la condición altamente variable del suelo y con las relaciones que allí existen entre sus múltiples componentes.

Los mejores resultados para cultivos comerciales de mora de Castilla se dan en zonas entre 1.800 y 2.600 msnm, que se clasifican como clima frío moderado, con temperaturas promedio entre 12 y 18°C, humedad entre 70% y 80%, precipitaciones de 1.500 a 2.500 mm al año, y 1.200 a 1.600 horas de brillo solar.

Algunos estudios reportan cantidades de nutrientes aplicadas al cultivo de mora para lograr buenos rendimientos. De acuerdo a Franco *et al.* (2000), esta especie responde positivamente a la aplicación de dosis de N de 250 kg.ha<sup>-1</sup>, 200 kg.ha<sup>-1</sup> de K y 200 kg.ha<sup>-1</sup> de P.

Al respecto, Vayas (2001), recomienda dosis de 330 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 60 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 300 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, fraccionadas en tres momentos que son la poda de formación (50% de las dosis), el cuajado de frutos (25% de las dosis) y desarrollo de los mismos (25% de las dosis). Martínez (2007), propuso una recomendación general de fertilización basada en la aplicación de 2 kg de abono orgánico enriquecido con microorganismos antagonistas de plagas y enfermedades (*Trichoderma* spp.), 100 g de 18-46-00 (N-P-K) y 100 g de 22-18-21,5 (K-Mg-S) en cada hoyo al momento del trasplante.

Cabezas *et al.* (2002) establecieron el efecto de la aplicación de gallinaza y P sobre mora de castilla en la zona centro del departamento de Boyacá. Se evaluó un total de 16 dosis de gallinaza y P y su efecto sobre número de flores y frutos formados, porcentaje de frutos cuajados, peso individual de frutos y producción. Se encontró un aumento significativo en las variables evaluadas con la aplicación de 100 kg.ha<sup>-1</sup> de P. En cuanto a la aplicación de gallinaza, reportaron que el suministro de hasta 4 t.ha<sup>-1</sup>, resultó en aumentos en el rendimiento de la fruta.

Por su parte, Roveda *et al.* (2008), mencionan que la aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) de los géneros *Acaulospora* sp. Y *Glomus* sp., mejoran la toma de nutrientes esenciales (N, P, Ca y Mg) en tejido vegetal en plantas de mora. Adicionalmente, Ramírez *et al.* (2008), mencionan que la inoculación con HFMA puede llegar a sustituir hasta un 50% de las aplicaciones de fertilizantes químicos, con lo cual se podrían reducir los costos de producción.

Estudios como el de Artunduaga (2000), analizan el efecto de la fertilización con N, P y K en ecotipos de mora con y sin espinas en el departamento del Quindío, y su influencia en el rendimiento, eficiencia agronómica y comportamiento fisiológico de los materiales;

obteniendo que mayores rendimientos se obtienen con niveles de 30-3-15 (N-P-K) para ecotipos con espinas y 30-5-39 (N-P-K) para moras sin espinas.

Orozco y Muñoz (2012) evaluaron el efecto de compost y lombricompost sobre las propiedades químicas del suelo y el rendimiento de mora (*R. adenotrichus* cv Vino); en dos localidades de la provincia de San José, Costa Rica. Los resultados mostraron que la aplicación de estos dos materiales incrementó el pH del suelo, redujo la acidez, incrementó la disponibilidad de Ca, Mg, K, N y P, y aumentó el porcentaje de materia orgánica. Con relación al rendimiento, se encontraron diferencias significativas en una de las localidades trabajadas, en la que la aplicación de enmiendas orgánicas conllevó mayor rendimiento del cultivo.

Actualmente, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), considerando las demandas de la cadena productiva de mora en Colombia, más específicamente en temas de manejo de suelos y aguas, y la necesidad de conocer los requerimientos nutricionales del cultivo en sus diferentes etapas, planteó desarrollar desde 2013 y hasta 2017, el proyecto denominado “Requerimientos nutricionales (N, P, K y Ca) del cultivo de mora (*Rubus glaucus* B.), determinados y manejo eficiente de la fertilización integrada”. En el transcurso del proyecto, esta institución evaluó la extracción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en plantas del genotipo mora sin espinas en condiciones controladas de invernadero, correspondientes a la etapa vegetativa inicial de emisión de raíces y brotes de la parte aérea; y los requerimientos nutricionales (N, P, K y Ca) de mora con espinas proveniente de propagación por semilla. Cardona (2017), encontró que la aplicación de: 237-135,3- 261,6-241,3 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O y CaO, respectivamente, permitió el rendimiento potencial más alto, y a su vez obtener frutos de mora con los valores más altos de firmeza, peso, diámetro ecuatorial y los mayores beneficios económicos. Bautista (2017), analizó la relación entre la nutrición del cultivo y la severidad de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* CEPA 52) bajo invernadero, demostrando la importancia del N y el Ca para el desarrollo vegetativo inicial de las plantas y su efecto frente a infecciones de la cepa 52. Dosis de 32-35-48-9 g/planta de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O y CaO, respectivamente, aplicada a plantas de mora de Castilla mostraron un efecto positivo sobre la antracnosis mediante la reducción en el porcentaje de severidad y la tasa de desarrollo, y permitieron a la vez un mayor índice de contenido de clorofilas.

### **La variabilidad natural del suelo y su estudio en sistemas de producción agrícola**

El suelo se considera un cuerpo continuo localizado en la superficie de la corteza terrestre, cuyas propiedades varían dentro de un rango determinado de valores (Jaramillo, 2011). Esta variabilidad es el resultado de la ocurrencia de complejos procesos geológicos y pedológicos, particularmente de la acción de los factores de formación como el material parental, los organismos, el clima, la geomorfología y el tiempo (Castrignanó *et al.*, 2000). La interacción a distintas escalas entre dichos procesos y la intervención de los factores formadores, hace que las propiedades presenten alta variabilidad y consecuentemente, dependencia espacial (Parkin, 1993; Cambardella *et al.*, 1994). Esta circunstancia complica el estudio convencional del suelo (Demsar *et al.*, 2013). Según Castrignanó *et al.* (2000), para el estudio de las propiedades del suelo que presentan una estructura de correlación dependiente de la escala espacial, el análisis conjunto de variables regionalizadas<sup>1</sup>, puede ser más adecuado en comparación con técnicas no espaciales de análisis multivariable o univariable.

Una de las herramientas convencionalmente usada para estudiar los cambios en las propiedades del suelo y la relación existente entre las mismas, es el análisis de componentes principales (ACP), que es una técnica multivariable de reducción de dimensión de datos, que modela la estructura de la covarianza entre los atributos considerados y en la que se pretende encontrar variables latentes que representen combinaciones lineales de las variables originales bajo estudio (Ferreira, 2008; Demsar *et al.*, 2013). Los métodos de reducción de dimensión de datos, proporcionan un medio para identificar tendencias en las características del suelo que pueden estar representadas por una amplia gama de variables (Kumar *et al.*, 2012). Algunos autores emplearon esta técnica para solucionar problemas de clasificación taxonómica de suelos (Rozhkov, 2013), determinar principales parámetros afectados por prácticas de manejo de suelo o prácticas de irrigación (Sena *et al.*, 2002), estudiar la distribución de la materia orgánica del suelo (Jiménez *et al.*, 2011), de contaminantes (Skrbic y Mladenovic, 2007) y de la porosidad del

---

<sup>1</sup> Una variable medida en el espacio de forma que presente una estructura de correlación, se dice que es una variable regionalizada. En términos prácticos puede verse como una medición de una variable aleatoria en un punto *x* de una región de estudio (Giraldo, 2002).

suelo (Lu *et al.*, 2014) , y las relaciones entre el contenido de agua y los agregados de suelo (An *et al.*, 2008).

Con respecto al estudio de la calidad de los suelos, se reportan investigaciones con relación al conjunto mínimo de datos (MDS, por sus siglas en inglés), para establecer índices de calidad de suelos. Mandal *et al.* (2008) identificaron indicadores físicos, químicos y biológicos para la evaluación de la calidad de suelo, en zonas donde se usan distintas fuentes de agua para irrigación. El ACP se empleó para obtener índices de calidad de suelo y se mostró el potencial de esta técnica para el ajuste de tales índices, a partir de propiedades físicas, químicas y microbiológicas de suelo.

Islabao *et al.* (2013), evaluaron la distribución temporal y espacial de parámetros de fertilidad de suelos durante el ciclo productivo de un cultivo de fresa. Para agrupar las propiedades químicas relacionadas entre sí y explicar la mayor variación del conjunto mínimo de variables emplearon el ACP. Se empleó un análisis de medidas repetidas en el espacio para evaluar el efecto de la ubicación sobre las propiedades químicas de suelo, encontrando que no se presentó relación entre la localización espacial y la condición de fertilidad del suelo y que la mayor variación en el lote experimental estuvo relacionada con la acidez de suelo y el contenido de materia orgánica.

Como puede notarse, las aplicaciones de ACP en ciencias del suelo son cada vez más diversas; no obstante, muchas de estas ignoran las características espaciales de los procesos estudiados y aplican un análisis estándar, obviando que la estructura de co-variación puede verse afectada por los patrones espaciales subyacentes en los datos (Córdoba *et al.*, 2012), y que el detalle de tales patrones es vital para lograr una mayor comprensión del fenómeno analizado. Demsar *et al.* (2013), describen técnicas espaciales de ACP, específicamente diseñadas para incluir efectos espaciales en los datos analizados. Estas variaciones de la técnica permiten estudiar las relaciones entre las variables medidas (análisis co-variabilidad) y, al mismo tiempo su estructura espacial (autocorrelación), lo que resulta conveniente en estudios de suelos (Dray *et al.*, 2008; Arrouays *et al.*, 2011). Según Jombart *et al.* (2008), los efectos espaciales son tomados en cuenta cuando el ACP clásico se combina con una medida de autocorrelación espacial, que se estima usando el Índice de Moran (Moran, 1950). Por su parte, Dray *et al.* (2008) propusieron una extensión del método convencional del ACP, conocida como

MULTISPATI-PCA, que incorporó información espacial antes de la obtención de las variables sintéticas con el ACP clásico.

Córdoba *et al.* (2013), propusieron el uso de componentes principales espaciales obtenidos mediante MULTISPATI-PCA como variables de entrada de algoritmos fuzzy k-means como una manera de incluir la autocorrelación en el agrupamiento de datos espaciales. El objetivo de su investigación fue aplicar dicha metodología en variables de suelo, como herramienta para identificar áreas de manejo homogéneo para el cultivo de cereales en Argentina. Así mismo, Schneider *et al.* (2016), investigaron la utilidad de MULTISPATI-PCA para analizar el origen y la distribución de elementos contaminantes de suelo, provenientes de la industria minera.

De otro lado, Demsar *et al.* (2013) mencionan dos técnicas adaptadas localmente a los atributos estudiados y al espacio geográfico. Estas técnicas no paramétricas se denominan ACP ponderado localmente y ACP ponderado geográficamente (ACP-PG). En el ACP ponderado geográficamente, desarrollado por Fotheringham *et al.* (2002), se asume que hay distintas regiones en el espacio geográfico en las cuales se aplican distintos modelos de ACP, de tal manera que un conjunto de datos o un proceso específico es espacialmente heterogéneo y es modelado como tal mediante esta técnica.

En el ACP-PG, los componentes principales se calculan mediante la descomposición de la covarianza local. Kumar *et al.* (2012), usaron el análisis de componentes principales ponderado geográficamente para evaluar la distribución espacial de las propiedades de suelo en Alfisoles, Ultisoles e Inceptisoles en Pensilvania (EEUU), encontrando que se presentó una marcada variación espacial en las características del suelo, lo cual no se pudo observar usando el ACP estándar. Arslan (2013), aplicó el ACP-PG para el análisis de calidad de aguas. Fernández *et al.* (2016), usaron este método para descubrir posibles fuentes de contaminación difusa de suelos por metales pesados de 334 muestras tomada en áreas prístinas en Asturias. La heterogeneidad espacial de los niveles de los metales y su relación con la litología y las actividades humanas se pudo caracterizar mediante ACP ponderado geográficamente, lo cual no fue posible con el análisis de componentes principales convencional o estándar.

Se evidencia la importancia de incluir técnicas que permitan observar la dinámica de variables de suelo que por su naturaleza se distribuyen en el espacio y la ventaja que presentan algunos métodos, al enfocarse en diferencias locales más que en similitudes globales. Lo anterior puede llevar a reducir la incertidumbre con respecto a las condiciones edáficas óptimas para el desarrollo del cultivo de mora y para lograr altos rendimientos.

### **Manejo de la fertilidad del suelo en sistemas productivos agrícolas**

El manejo del suelo para hacer frente a los bajos rendimientos en sistemas de producción intensivos es una de las temáticas más abordadas en la investigación en el campo agrícola (Ayoola, 2010). Radulov *et al.* (2011), afirman que los suelos sin un manejo adecuado son incapaces de suministrar a las plantas la cantidad de nutrientes requeridos para obtener los rendimientos productivos esperados. A causa de esto el uso complementario de abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis química se ha considerado como una importante estrategia para mantener la fertilidad del suelo y lograr la sostenibilidad de los agroecosistemas (Lombin *et al.*, 1991).

A nivel mundial para el año 2002, se reportó la aplicación de 142 millones de t de nutrientes para las plantas de las que cerca de 85 millones representaron N. El contenido de P disponible para las plantas que continúa siendo la mayor limitante en sistemas productivos, dada la fuerte adsorción en suelos ácidos y derivados de cenizas volcánicas y la formación de compuestos insolubles con el Ca en condiciones alcalinas, hizo que para este mismo año el consumo mundial de  $P_2O_5$  ascendiera a cerca de 33,6 millones de t (Roy *et al.*, 2006). Para el año 2015 el consumo mundial de fertilizantes ( $N + P_2O_5 + K_2O$ ) alcanzó 186,6 millones de toneladas, con un sucesivo aumento previsto de 1,6% por año, con el que se espera alcanzar 199 millones al final de 2019 (FAO, 2016).

Los fertilizantes inorgánicos no solo mantienen o aumentan los rendimientos en los sistemas productivos, sino que su aplicación puede también causar directa o indirectamente, cambios en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Belay *et al.*, 2002). Estos cambios, a largo plazo, pueden tener efectos significativos sobre la capacidad productiva del suelo (Acton y Gregorich, 1995); no obstante, prevalece la incertidumbre con respecto a este tema. Algunos estudios señalan que el uso continuo de

fertilizantes inorgánicos pueden causar cambios en las propiedades del suelo que finalmente conllevan al deterioro de su calidad (Cassman y Pingali 1995; Doran *et al.*, 1994).

Belay *et al.* (2002), evaluaron el efecto de la aplicación de NPK sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo, y el rendimiento de maíz en rotación con arveja. A largo plazo, la fertilización química con fuentes simples condujo a la disminución en el contenido total de carbono orgánico y de cationes intercambiables, y tuvo un efecto significativo sobre la acidez del suelo, así mismo el efecto fue negativo sobre el rendimiento del cultivo cuando se aplicaron este mismo tipo de fuentes, señalando que el uso de fertilizantes inorgánicos y la aplicación desbalanceada de los mismos puede significar la disminución de la calidad del suelo y de su capacidad productiva a largo plazo. Ayoola (2010), analizaron los rendimientos de maíz, melón, yuca y frijol en policultivo así como las propiedades químicas del suelo bajo diferentes tratamientos de fertilización (orgánica, química, mixta y sin fertilización). Luego de la aplicación de fertilizantes los rendimientos para cada especie aumentaron con respecto al tratamiento sin fertilización; no obstante, el contenido de N, P, K, carbono orgánico, Ca y Mg disminuyó en relación a los contenidos iniciales, señalando que las tasas de fertilizantes aplicadas pueden no ser aptas para mantener la fertilidad del suelo.

Cakmak *et al.* (2010), Radulov *et al.* (2011), Junkeira *et al.* (2011), Ann (2012), entre otros, evidencian el efecto a largo plazo de la fertilización sobre las propiedades químicas del suelo y el rendimiento de los cultivos. Por otro lado, investigaciones indican la ausencia de cambios evidentes en las propiedades del suelo luego de su intervención con aplicación de fertilizantes de síntesis química (Aref y Wander 1998). Más recientemente, Tedla (2001) evaluó el efecto directo y residual del uso de fertilizantes sintéticos y abonos orgánicos sobre las propiedades químicas, microbiológicas y la productividad del cultivo de maíz en rotación con frijol, obteniendo que a largo plazo la aplicación de NPK aumentó el rendimiento de los cultivos y resultó en una disminución del carbono orgánico total y del contenido de cationes intercambiables, así como en la disminución del pH del suelo. Mondal *et al.* (2015), reportaron que el contenido de N mineralizable y de K intercambiable no mostraron cambios significativos a corto plazo, luego de la aplicación de lodos municipales en un cultivo de frijol- trigo. Liu *et al.* (2017), investigaron el efecto de la aplicación de fertilizantes de síntesis química (NPK) en combinación con enmiendas



orgánicas sobre el status nutricional del suelo y el rendimiento del cultivo de arroz durante tres ciclos de producción, encontrando que el uso de fertilizantes aumentó el rendimiento del cultivo y el pH, el contenido de nitrógeno y de materia orgánica no fueron afectados significativamente por esta práctica, contrario a lo sucedido con el contenido disponible de P y K.

Como es visto, los resultados con respecto al efecto de la aplicación de fertilizantes sobre las propiedades químicas del suelo difieren sustancialmente; no obstante, los reportes coinciden en los enfoques metodológicos empleados para el procesamiento de la información acopiada. Comúnmente, los trabajos que analizan diferentes atributos biológicos, físicos, químicos, hídricos y mineralógicos de suelo, lo realizan mediante técnicas estadísticas univariadas, lo que restringe las interpretaciones y las conclusiones, al no explorar la existencia de dependencia conjunta entre las variables analizadas, lo cual puede realizarse por medio de la estadística multivariante (Fidalski *et al.*, 2007).

Sokal y Rohlf (1995) citados por Zwanenburg *et al.* (2011), afirma que los diseños experimentales con una sola variable de respuesta son analizados mediante ANOVA; actualmente en las ciencias biológicas lo anterior es la excepción a la regla, ya que el ANOVA no toma en cuenta las interacciones que se presentan entre las variables de respuesta estudiadas, cuando son más de una. En el análisis multivariado los resultados se explican mediante la conformación de grupos, lo que permite visualizar la relación entre cada una de las propiedades analizadas (Camacho *et al.*, 2010). Ståhle y Wold (1990), hace referencia al MANOVA (análisis de varianza multivariante) como técnica empleada convencionalmente en estudios en los que se consideran más de una variable. No obstante, el MANOVA pierde funcionalidad cuando el número de mediciones es menor que el número de variables, lo que es común en datos biológicos; adicionalmente, los supuestos que se requieren para que esta herramienta arroje resultados interpretables, por ejemplo, distribución normal multivariante de los datos, pocas veces se cumplen.

En la literatura sobre análisis de datos se han reportado metodologías híbridas de análisis multivariante y análisis de varianza (Smilde *et al.*, 2005). Uno de los enfoques propuestos lleva a cabo un análisis de componentes principales sobre el conjunto de datos, y luego usa el ANOVA sobre las puntuaciones obtenidas de los componentes para probar los

efectos de los factores estudiados; sin embargo, el ACP no necesariamente separa los resultados en grupos de acuerdo a los factores evaluados (Bratchell, 1989; Jackson, 1991).

Smilde *et al.* (2005), presenta un nuevo método que puede tratar estructuras de diseños multivariados complejos. ASCA (ANOVA- simultaneous component analysis, por sus siglas en inglés) usa el modelo del análisis de varianza para descomponer la matriz de datos originales en las matrices de efectos de los factores considerados y una matriz con los residuales que no son explicados por el modelo. Aunque el ASCA ha sido empleado en estudios de metabolómica y otras áreas de la quimiometría (Lamers *et al.*, 2003; Jansen *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2006), su uso en ciencias del suelo aún no se ha reportado.

Las técnicas mencionadas pueden resultar útiles para el análisis de datos relacionados con las propiedades del suelo y otros atributos de los sistemas productivos. No obstante, este tipo de metodologías asumen que dichos cambios se distribuyen aleatoriamente en el espacio y el tiempo y no toman en cuenta que la variabilidad de los mismos es el resultado de muchos procesos que interaccionan a una escala de tiempo y espacio específica (Parkin, 1993; Cambardella *et al.*, 1994; Cambardella *et al.*, 1996).

En algunos casos el enfoque convencional en el diseño de experimentos puede no ser el más adecuado para el análisis de variables que naturalmente muestran la condición descrita. Aunque se ha tratado de compensar la variabilidad de algunos fenómenos de estudio mediante el incremento del número de muestras utilizadas para estimar los valores promedios que caracterizan las propiedades, o la aleatorización y el bloqueo por restricciones de campo, no en todos los casos se ha logrado hacer frente a la heterogeneidad inherente del suelo (Zas, 2008).

Martínez (1994), afirma que la aleatorización por sí sola, no es capaz de neutralizar los efectos de la correlación espacial que se presenta entre unidades experimentales vecinas y que esta condición puede invalidar los resultados de los análisis de varianza que se realicen con ellas, en caso de que los supuestos en que descansan estos análisis no se cumplan. La independencia de las observaciones (uno de los supuestos en cuestión), puede verse condicionada cuando los datos presentan una estructura espacial no aleatoria a mayor o menor escala, es decir, cuando existe heterogeneidad espacial. Esto es común

en cualquier ambiente, en el que la distribución de los condicionantes tanto físicos como biológicos no es aleatoria, ni uniforme (Legendre, 1993). De esta manera, cuando se analizan variables de experimentos en campo es importante prestar especial atención a la posible autocorrelación espacial de los datos, cuya presencia podría poner en duda los resultados del análisis (Dutilleul, 1993). Diversos autores han demostrado que aplicar el análisis de varianza cuando existe heterogeneidad espacial sin realizar ningún tipo de ajuste deriva en un cálculo erróneo del nivel de significancia de los efectos del modelo y de la proporción de varianza explicada por cada factor.

Bhatti *et al.* (1991), Saldarriaga (2002) y Jaramillo (2005), concuerdan en que la variabilidad espacial del suelo puede alterar los efectos de los tratamientos en estudio, llevando a conclusiones erróneas acerca de prácticas de manejo en los cultivos. Desde que en 1937, Papadakis (1937) propusiera el método de ajuste espacial basado en la covariación de las unidades experimentales vecinas, se han desarrollado multitud de aproximaciones para solventar el problema. Eventualmente, se puede recurrir a métodos de ajuste cuyo fin último es “limpiar” las observaciones de la covariación debida a la dependencia espacial. Una manera de intentar ajustar los modelos según la estructura espacial de los datos es el uso de funciones polinómicas de las coordenadas espaciales como covariables, método denominado análisis de tendencia de superficie o trend surface analysis (Tamura *et al.*, 1988, Schabenberger y Gotway 2005), usado en estudios sobre análisis de datos experimentales espacialmente correlacionados en el área agronómica (Jaramillo, 2005; Jaramillo, 2006).

## **4. Materiales y métodos**

### **4.1 Localización del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en la finca La Península (15.000 m<sup>2</sup>), vereda Aguabonita, provincia del Sumapáz, municipio de Silvania, Cundinamarca (04° 25'37.8" N; 74°20'22.4" O; 2170 msnm; 20°C; 1400 mm/año).

## 4.2 Diseño experimental

Esta investigación se realizó en un cultivo experimental ya establecido en un diseño factorial completo con arreglo en campo en bloques completos al azar con 25 tratamientos, tres bloques y 75 unidades experimentales. El diseño de tratamientos obedeció a un central compuesto con cuatro factores, que corresponden a cuatro nutrientes (N, P, K y Ca) y cinco niveles (dosis de cada nutriente) por factor. Los tratamientos con sus correspondientes dosis de cada nutriente se presentan en el anexo A. Se sembraron 3.000 plántulas de mora con tunas a una distancia de 2 m entre plantas y 2,5 m entre surcos para un área total efectiva de 15.000 m<sup>2</sup>.

## 4.3 Descripción de suelos de la zona de estudio

La descripción de suelos se hizo a los 481 días después de trasplante, para ello se realizaron dos cajuelas y una calicata en zonas contrastantes del lote, correspondientes a los bloques del experimento, de manera que los perfiles descritos en el bloque 1 y bloque 3 se denominaron BL1 y BL3, respectivamente, y el perfil descrito mediante la calicata que fue realizada en el bloque 2 se denominó BL2.

En BL1 y BL3 se diferenciaron los horizontes, se determinó presencia de cenizas volcánicas con NaF y se tomaron muestras para análisis mineralógicos. En BL2 se hizo una descripción morfológica de los horizontes del suelo, detallando aspectos como pH, textura, estructura, color y presencia de cenizas volcánicas con NaF, adicionalmente, se tomaron muestras de suelo para análisis físicos, químicos y mineralógicos, que fueron enviadas al Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En los tres perfiles muestreados se incluyó la observación y análisis de aspectos micromorfológicos del suelo, para lo cual se tomaron muestras en forma de bloques esculpidos agregados de la parte media de los horizontes descritos, con el menor grado de perturbación posible, semejando las condiciones naturales del suelo (Figura 1), que

luego fueron empacadas y rotuladas, de acuerdo a la metodología descrita por Stoops (2003). Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi para su preparación y lectura, que se realizó usando un microscopio óptico polarizante.

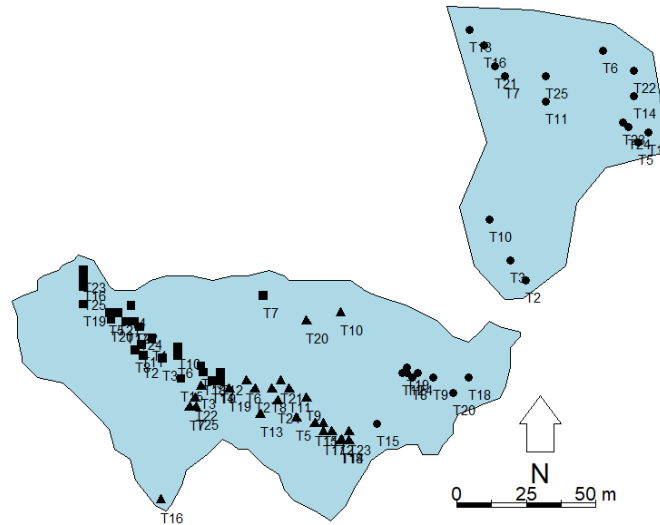


**Figura 1.** Muestra de suelos para análisis micromorfológico, tomada del horizonte Ap del perfil BL2, en el lote experimental del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

La interpretación de la información obtenida de los análisis de laboratorio y de la descripción morfológica en campo, se realizó con base en los parámetros enunciados en Soil Survey Staff (2014). Para la interpretación complementaria de las características micromorfológicas de suelo se siguieron los criterios expuestos en Stoops (2003), Stoops *et al.* (2010) y Loaiza *et al.* (2015).

#### **4.4 Muestreo de suelos para determinación de propiedades químicas y registro de productividad del cultivo**

Paralelo a la descripción mencionada anteriormente, se realizó la toma de muestras para determinación de propiedades químicas de suelo y el registro de la productividad del cultivo por cada unidad experimental, de tal manera que se tomaron 75 muestras de suelo en los puntos que se observan en la figura 2. La productividad expresada como el promedio de gramos de mora obtenidos de las 40 plantas de cada unidad experimental.



**Figura 2.** Ubicación de los puntos de muestreo en cada unidad experimental del lote de cultivo de mora de Castilla (*R. glaucus* Benth.) Cuadrados: Bloque experimental 1. Triángulos: Bloque experimental 2. Círculos: Bloque experimental 3.

La **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** muestra las variables medidas en cada uno de los 75 puntos muestreados y georreferenciados, uno en cada unidad experimental. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria C.I. Tibaitatá.

**Tabla 1.** Parámetros medidos por cada unidad experimental en el cultivo de mora (*R. glaucus* Benth) en el municipio de Sylvania, Cundinamarca.

Variable		Unidad de medida	Método analítico
<b>PROD</b>	Productividad	g/planta	Promedio de gramos de mora por planta
<b>pH</b>	pH		Método potenciométrico*
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	Método conductimétrico*
<b>MO</b>	Materia orgánica	%	Walkley y Black (1934)*
<b>P</b>	Fósforo disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Bray II*
<b>S</b>	Azufre disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Fosfato monobásico de calcio*
<b>AcI</b>	Acidez intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con KCl*
<b>Al</b>	Aluminio intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con KCl*
<b>Ca</b>	Calcio intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> 1M y pH 7,0*

<b>Mg</b>	Magnesio intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> 1M y pH 7,0*
<b>K</b>	Potasio intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> 1M y pH 7,0*
<b>Na</b>	Sodio intercambiable	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Extracción con CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> 1M y pH 7,0*
<b>CICE</b>	Capacidad de intercambio catiónico efectiva	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	Suma de cationes*
<b>Fe</b>	Hierro disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Extracción DTPA NTC 5526*
<b>Mn</b>	Manganeso disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Extracción DTPA NTC 5526*
<b>Zn</b>	Zinc disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Extracción DTPA NTC 5526*
<b>Cu</b>	Cobre disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Extracción DTPA NTC 5526*
<b>B</b>	Boro disponible	mg kg <sup>-1</sup>	Extracción con Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *
<b>Ca/Mg</b>	Relación calcio/magnesio	-	-
<b>Ca+Mg/K</b>	Relación calcio+magnesio/potasio	-	-
<b>Mg/K</b>	Relación magnesio/potasio	-	-
<b>Ca/B</b>	Relación calcio/boro	-	-

\*Método analítico del Laboratorio de Suelos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria con base en NTC ISO/IEC 17025.

Con los datos obtenidos del laboratorio sobre propiedades químicas de suelo y el registro de cosecha por cada unidad experimental, se realizó el procesamiento estadístico que se describe más adelante.

## 4.5 Interrelación de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo

Para establecer la interrelación entre propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo se realizó un análisis descriptivo univariable de la información y luego se empleó el ACP, como técnica exploratoria, para efectuar el análisis de correlación entre las variables, sin tener en cuenta la agrupación de las mismas por efecto de los tratamientos.

### 4.5.1 Análisis descriptivo univariable

Inicialmente se realizó un análisis descriptivo univariable de los datos, considerando su valor máximo y mínimo, promedio aritmético, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación de la media, asimetría y curtosis.

#### **4.5.2 Análisis descriptivo multivariable**

Como análisis estadístico descriptivo multivariable se empleó el ACP convencional, también llamado ACP global, que luego fue contrastado con el ACP ponderado geográficamente. En este último, la matriz de varianzas y covarianzas (o de correlación) del ACP global fue ponderada en función de la localización de cada punto de acuerdo con Fotheringham *et al.* (2002). Mediante simulación se ajustó el ancho de banda. La función de ponderación seleccionada para este procedimiento fue bicuadrado. La no estacionariedad de los autovalores obtenidos del ACP-PG se comprobó mediante simulación Monte Carlo.

Se calculó el porcentaje de variación total explicada por cada componente extraído en el ACP global y su correlación con cada una de las variables analizadas. Partiendo del número de componentes con mayor poder de interpretación en el ACP global se procedió a realizar el ACP ponderado geográficamente.

Las variables con las mayores cargas en los componentes resultantes fueron extraídas y mapeadas, como lo sugiere Lloyd (2010).

### **4.6 Efecto de las dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo**

Se efectuó el análisis inferencial de la información para involucrar el efecto de los tratamientos sobre las variables. Se realizó en primer lugar un análisis espacial de la información sobre aquellas variables para las cuales se presentara algún grado de correlación espacial entre unidades experimentales, que ocultara el verdadero efecto de los tratamientos sobre las mismas. Para las variables que no se presentara dicha circunstancia se realizó un análisis multivariante para establecer el efecto de la aplicación de las distintas dosis de nutrientes sobre estas.

#### **4.6.1 Análisis espacial de datos**

Con los datos de propiedades químicas del suelo y productividad obtenidos de cada punto de muestreo se hizo un análisis gráfico que consistió en realizar diagramas de dispersión



entre cada variable y las coordenadas en cada eje ( $x$  e  $y$ ). El gráfico se construyó tomando como eje de las abscisas la coordenada geográfica y en el eje de las ordenadas la variable cuantitativa de estudio.

Los gráficos de dispersión resultan útiles tanto para la detección de relaciones entre las variables como para la identificación de tendencias en el valor promedio de la variable en la región (relación entre la variable medida y las coordenadas geográficas). La observación de la nube de puntos resultante, permitió establecer empíricamente si existe dicha tendencia (Giraldo, 2002).

Aquellas variables que presentaron tendencia espacial fueron sometidas a un análisis de tendencia de superficie (TSM, por sus siglas en inglés), en el cual se ajustó un modelo lineal de segundo grado, tomando cada atributo como variable de respuesta y las coordenadas estandarizadas en  $x$  e  $y$  como variables explicativas. Como medida para evitar el sobre ajuste de parámetros en los modelos se empleó el criterio de información de Akaike. Los residuales obtenidos de los modelos ajustados fueron sometidos a verificación de supuestos de normalidad y homocedasticidad, mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente.

Sobre los residuales de los modelos de tendencia ajustados se realizó un ANOVA ( $\alpha=0,05$ ) y los resultados fueron comparados con análisis de varianza univariantes hechos sobre las variables originales, en ambos casos tomando como factores los tratamientos y bloques. Se confrontaron los resultados de las pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey (5%), obtenidas de tomar los residuales del modelo de superficie y las variables originales como variables de respuesta. Adicionalmente, se comprobó si el comportamiento de los tratamientos era homogéneo en todos los bloques o si por el contrario existía interacción entre tratamientos y bloques mediante la prueba de aditividad de Tukey (5%).

#### **4.6.2 Análisis no espacial de datos**

El análisis no espacial de la información se realizó sobre las variables que no presentaron tendencia según los dispersogramas realizados. En principio, se llevó a cabo un análisis de varianza multivariante (MANOVA) ( $\alpha=0,05$ ) para verificar si la aplicación de tratamientos tuvo efecto conjunto sobre las propiedades químicas de suelo y la productividad del cultivo.

Posteriormente se procedió a verificar por cada variable si se presentó o no tal efecto mediante un análisis de varianza univariante (ANOVA) ( $\alpha=0,05$ ). En caso de presentarse diferencias significativas se realizó la prueba múltiple de comparación de medias de Tukey (5%). Se verificaron supuestos de normalidad multivariante mediante el Test de Mardia (5%) y homogeneidad de matrices de varianza y covarianza mediante la prueba de M de Box (5%). Como camino alternativo en caso de no cumplirse los supuestos mencionados se usó una técnica inferencial multivariante (ASCA- ANOVA simultaneous component analysis) que combina el análisis de varianza clásico y el análisis de componentes principales para evaluar el efecto de factores experimentales sobre múltiples variables de respuesta y su agrupación. Se realizaron permutaciones de los resultados obtenidos con el ASCA para verificar el efecto de los tratamientos y bloques sobre las variables consideradas en este análisis.

El procesamiento estadístico de los datos se realizó en el entorno de libre acceso para estadística computacional y gráficos R (v. 3.4.2) (R Core Team, 2017), empleando los paquetes *sp* (Pebesma y Bivand, 2005), *rgdal* (Bivand *et al.*, 2016), *moments* (Komsta y Novomestky, 2015), *tmaps* (Tennekes, 2017), *GWmodel* (Gollini *et al.*, 2015), *MetStat* (Dorscheidt, 2013) y *agricolae* (de Mendiburu, 2017).

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Descripción de suelos de la zona de estudio

Según el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca, los suelos de la zona de estudio se ubican dentro de una unidad cartográfica con Inceptisoles y Andisoles, desarrollados a partir de mantos de cenizas volcánicas sobre depósitos clásticos gravigénicos. Se encuentran en paisajes de montaña, de relieve moderadamente quebrado, con pendientes entre 12 y 25% (IGAC, 2000).

La descripción general del perfil BL2 según información de la zona tomada del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000), se resume en el Anexo A.

La unidad cartográfica en la que se localiza la finca de estudio señala que el material parental de la zona corresponde a mantos de ceniza volcánica, lo que concuerda con lo afirmado por Sánchez (2015), quien resalta que en el flanco occidental de la región Andina, bordeando los departamentos de Cundinamarca y Huila, existen amplios sectores recubiertos por mantos de ceniza volcánica de espesor variable, siendo de menor espesor en zonas de alta pendiente. La presencia de materiales de baja cristalinidad puede determinar la dinámica de los nutrientes en el suelo y tener influencia en el efecto de los tratamientos sobre las propiedades químicas estudiadas y sobre la producción de fruta. El perfil descrito en la calicata del bloque 2 del lote de cultivo de mora se presenta en el Anexo A. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Los resultados de los análisis de laboratorio para propiedades químicas se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades químicas de los horizontes del perfil BL2 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Profundidad	0-27 cm	27-62 cm	62-104 cm
pH	5,71	6,7	5,11
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,13	1,32	0,07
MO (%)	9,15	6,13	0,4
P (mg kg <sup>-1</sup> )	5,49	58,21	3,51
S (mg kg <sup>-1</sup> )	9,8	18,86	12,9
Acidez intercambiable (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0	0	9,81
Al (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0	0	8,62
Ca (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	1,5	16,45	1,35
Mg (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,34	3,74	0,34
K (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,15	3,69	0,14
Na (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,19	0,1
CICE (cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,09	24,07	11,74
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	287,93	32,11	64,06
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	2,26	1,78	3,88
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	1	1,48	1

<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	2,56	1	1
<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	0,13	0,49	0,07
<b>Saturación de Ca (%)</b>	72	68	11
<b>Saturación de Mg (%)</b>	16	16	3
<b>Saturación de K (%)</b>	7	15	1
<b>Saturación de Na (%)</b>	10	1	1
<b>Saturación de Al (%)</b>	0	0	73
<b>Ca/Mg</b>	4,4	4,4	4
<b>Ca+Mg/K</b>	12,3	5,5	12,1
<b>Mg/K</b>	2,3	1	2,4
<b>Ca/B</b>	2333	6708	3952

El pH de los horizontes va desde fuertemente ácido (5,11) a casi neutro (6,7). Por su bajo pH, el horizonte B3 reporta contenido de Al y acidez intercambiable. No se presentan problemas de altos contenidos de sales en ningún horizonte, de acuerdo a los valores de conductividad eléctrica. El contenido de materia orgánica es medio (entre 5y 10%) para el horizonte Ap y tiende a disminuir con la profundidad, este mismo horizonte presenta alto contenido de Fe, al igual que el horizonte B2. El horizonte B1 presenta altos contenidos de P, Ca, Mg y K. Con respecto a micronutrientes, el contenido en los horizontes es bajo, con excepción del horizonte B2 que muestra contenidos medios para Zn y B. La relación Ca/Mg se encuentra en niveles ideales en todos los horizontes.

Con relación a las propiedades físicas de los suelo de cada bloque experimental se tiene que BL1 cuenta con la mayor proporción de agregados de diámetro inferior a 0,25 mm (21%), en comparación con BL3 y BL2, que cuentan con 15,3% y 17,3%, respectivamente, así mismo presentan el mayor porcentaje de porosidad total con 81%. Esta porosidad se considera alta, lo que supone una muy buena aireación aunque una escasa retención de humedad y nutrientes, si tomar en cuenta aún las características mineralógicas del suelo. Los resultados de mineralogía de arenas en la Tabla 3, el porcentaje de minerales en la fracción densa y liviana de arenas de los tres perfiles en la Tabla 4 mineralógica de las arcillas, basada en la identificación de minerales y la estimación de su abundancia relativa se puede observar en la Tabla 5.

**Tabla 3.** Mineralogía de la fracción arenosa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Silvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	B	C	Qz	D	Fp	Fg. L	Gal	Hm	Hs	Hr	L	Ma	T	Vv	Z
	0-11	-	tr	76	-	1	-	-	-	4	11	tr	7	-	1	-
	11-48	-	tr	52	-	3	-	1	1	12	19	tr	6	-	6	-
	48-77	1	tr	82	-	4	-	1	-	2	8	tr	tr	-	2	-
	0-27	-	-	78	tr	2	-	-	1	4	10	-	4	-	1	-
	27-62	-	2	63	tr	2	-	-	-	10	15	tr	6	-	2	-
	0-34	-	-	73	tr	tr	2	1	2	2	16	-	2	-	1	-
	34-73	tr	tr	46	tr	4	-	-	-	1	38	tr	9	1	1	tr

B: Biotita. C: Circón. Qz: Cuarzo. D: Diopsido. Fp: Feldepatos. Fg. L: Fragmentos líticos. Gal: Granos Alterados. Hm.: Hematita. Hs: Hiperstena. Hr.: Hornblenda. L: Lamprobolita. Ma: Magnetita. T: Turmalina. Vv: Vidrio Volcánico. Z: Zoisita.

En la Tabla 3 se tiene el contenido mineralógico de los perfiles muestreados con relación a su fracción arenosa. En todos los perfiles domina el cuarzo y seguidos se encuentran la hornblenda y la hiperstena, en menor proporción se presentan minerales como magnetita, vidrio volcánico, feldespatos y hematita. En BL1 se presentan bajas cantidades de biotita, granos alterados y trazas de circón y lamprabolita. En BL2 se reportan cantidades bajas de circón, granos alterados y trazas de diópsido y lamprabolita. En BL3 son bajas las cantidades de fragmentos líticos, granos alterados, turmalina y trazas de zoisita, lamprabolita, biotita, diópsido y circón. El porcentaje total de minerales en la fracción densa y liviana de arenas se ilustra en la Tabla 4, específicamente, los porcentajes de cada mineral en ambas fracciones en los tres perfiles se muestran en el Anexo C, Anexo D y Anexo E, respectivamente.

**Tabla 4** y la caracterización mineralógica de las arcillas, basada en la identificación de minerales y la estimación de su abundancia relativa se puede observar en la Tabla 5.

**Tabla 3.** Mineralogía de la fracción arenosa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	B	C	Qz	D	Fp	Fg. L	Gal	Hm	Hs	Hr	L	Ma	T	Vv	Z
	0-11	-	tr	76	-	1	-	-	-	4	11	tr	7	-	1	-
	11-48	-	tr	52	-	3	-	1	1	12	19	tr	6	-	6	-
	48-77	1	tr	82	-	4	-	1	-	2	8	tr	tr	-	2	-
	0-27	-	-	78	tr	2	-	-	1	4	10	-	4	-	1	-
	27-62	-	2	63	tr	2	-	-	-	10	15	tr	6	-	2	-
	0-34	-	-	73	tr	tr	2	1	2	2	16	-	2	-	1	-
	34-73	tr	tr	46	tr	4	-	-	-	1	38	tr	9	1	1	tr

B: Biotita. C: Circón. Qz: Cuarzo. D: Diopsido. Fp: Feldepatos. Fg. L: Fragmentos líticos. Gal: Granos Alterados. Hm.: Hematita. Hs: Hiperstena. Hr.: Hornblenda. L: Lamprobolita. Ma: Magnetita. T: Turmalina. Vv: Vidrio Volcánico. Z: Zoisita.

En la Tabla 3 se tiene el contenido mineralógico de los perfiles muestreados con relación a su fracción arenosa. En todos los perfiles domina el cuarzo y seguidos se encuentran la hornblenda y la hiperstena, en menor proporción se presentan minerales como magnetita, vidrio volcánico, feldespatos y hematita. En BL1 se presentan bajas cantidades de biotita, granos alterados y trazas de circón y lamprabolita. En BL2 se reportan cantidades bajas de circón, granos alterados y trazas de diópsido y lamprabolita. En BL3 son bajas las cantidades de fragmentos líticos, granos alterados, turmalina y trazas de zoisita, lamprabolita, biotita, diópsido y circón. El porcentaje total de minerales en la fracción densa y liviana de arenas se ilustra en la Tabla 4, específicamente, los porcentajes de cada mineral en ambas fracciones en los tres perfiles se muestran en el Anexo C, Anexo D y Anexo E, respectivamente.

**Tabla 4.** Mineralogía de arenas de la fracción liviana y densa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	Porcentaje de la fracción liviana	Porcentaje de la fracción densa
	0-11	67,2	32,8
	11-48	72,9	27,1
	48-77	73,3	26,7
	0-27	62,1	37,9
	27-62	57,1	42,9
	0-34	60,6	39,4
	34-73	56,9	43,1

Los minerales de la fracción liviana dominan sobre los de la fracción densa para todos los horizontes en los tres perfiles, lo cual coincide con lo reportado por Shoji *et al.* (1993), quienes afirman que las cenizas volcánicas están compuestas predominantemente por minerales primarios livianos (densidad menor a 2,8 g cm<sup>-3</sup>) y en menor proporción por minerales pesados (densidad mayor a 2,8 g cm<sup>-3</sup>), en porcentaje entre 60 y 95% para livianos y entre 5 y 40% para minerales pesados. Nanzyo (2002), sugiere que los minerales presentes en suelos con cenizas volcánicas incluyen feldespatos, cuarzo, hornblenda, hiperstena, augita, magnetita, biotita, apatita y principalmente vidrio volcánico.

La mineralogía de la fracción liviana de arenas del horizonte superficial de BL1 y BL2 muestra contenidos de vidrio volcánico. Luego de procesos de alteración de este mineral se da la liberación de elementos al suelo como Na, K, Al y Si; dependiendo de la relación

Si/Al en el medio, pueden formarse complejos sílico- aluminosos que a su vez dan lugar a la aparición de alófana, imogolita o haloisita (Hiradate y Wada, 2005). Lo anterior se relaciona con la presencia de materiales no cristalinos, que se reporta en los resultados de la mineralogía de arcillas de los perfiles estudiados.

La importancia de la fracción fina del suelo radica en que la proporción, composición y estructura de los minerales de la arcilla determina en gran medida la capacidad de los suelos para intercambiar, fijar o retener iones presentes en la solución del suelo y algunas propiedades físicas como la capacidad de retención de humedad (Sánchez, 2016). La caracterización del suelo con respecto a la fracción arcillosa se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Mineralogía de la fracción arcillosa de los perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	Co	Cr	Qz	Gb	Int 2:1 2:2	Mat. no cris.	M
	0-11	tr	tr	+	-	-	++++	-
	11-48	+	+	++	-	-	+++	-
	48-78	+	+	++	-	-	+++	-
	0-27	+	tr	+	-	-	++++	-
	27-62	+	+	++	+	-	+++	-
	0-32	+++	-	++	-	tr	+	++
	32-60	+++	-	++	-	tr	++	++

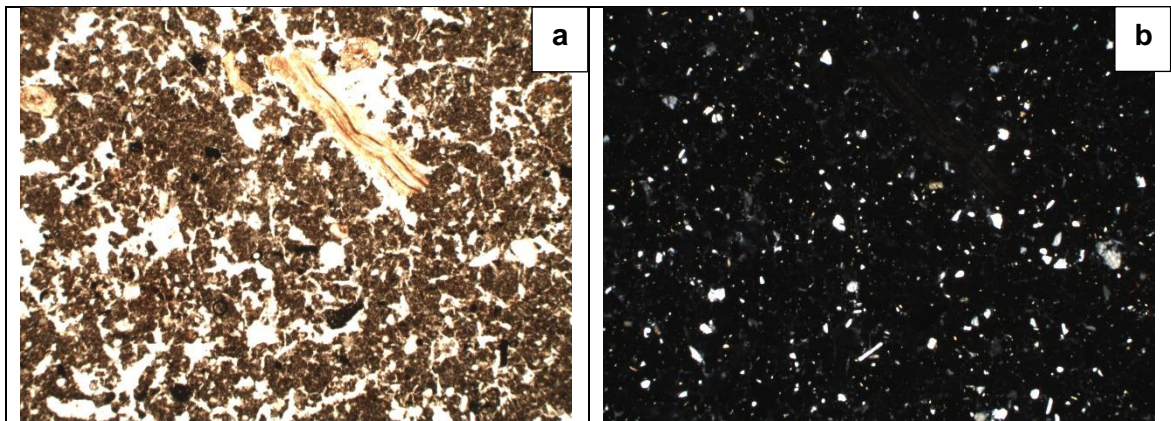
Co: Caolinita. Cr: Cristobalita. Qz: Cuarzo. Gb: Gibsita. Int 2:1 2:2: Integrados 2:1 2:2. Mat. No cris.: Material no cristalino. M: Mica. Convenciones: ++++ Dominante (>50%); +++ Abundante (30-50%); ++ Común (15-30%); tr Trazas (< 5%). Integrados 2:1 2:2 corresponden a arcillas 2:1 (Vermiculita o Montmorillonita) con pequeñas y aisladas capas octáedricas de hidroxialúmina en el espacio interlaminaar.

La caolinita aparece como el mineral dominante en los horizontes del perfil BL3, seguido por el cuarzo, las micas y el material no cristalino, contrario a lo que se presenta en BL1 y BL2, en los que el material no cristalino domina sobre el cuarzo y la caolinita, lo que se relaciona con los altos contenidos de vidrio volcánico presentes en la fracción liviana de arenas de los perfiles BL1 y BL2. Según Hiradate y Wada (2005), el vidrio volcánico se transforma en aluminosilicatos de baja cristalinidad como la alófana y la imogolita, en etapas tempranas de alteración. El esquema de alteración propuesto por Harsh *et al.* (2002), hace énfasis en el efecto del clima y el material parental, por encima del efecto del tiempo sobre la composición mineralógica de la arcilla en suelos que contienen materiales volcánicos. Este modelo sugiere que la alteración del vidrio volcánico da como resultado la formación de imogolita y alófana, dependiendo de la concentración de Si en la solución

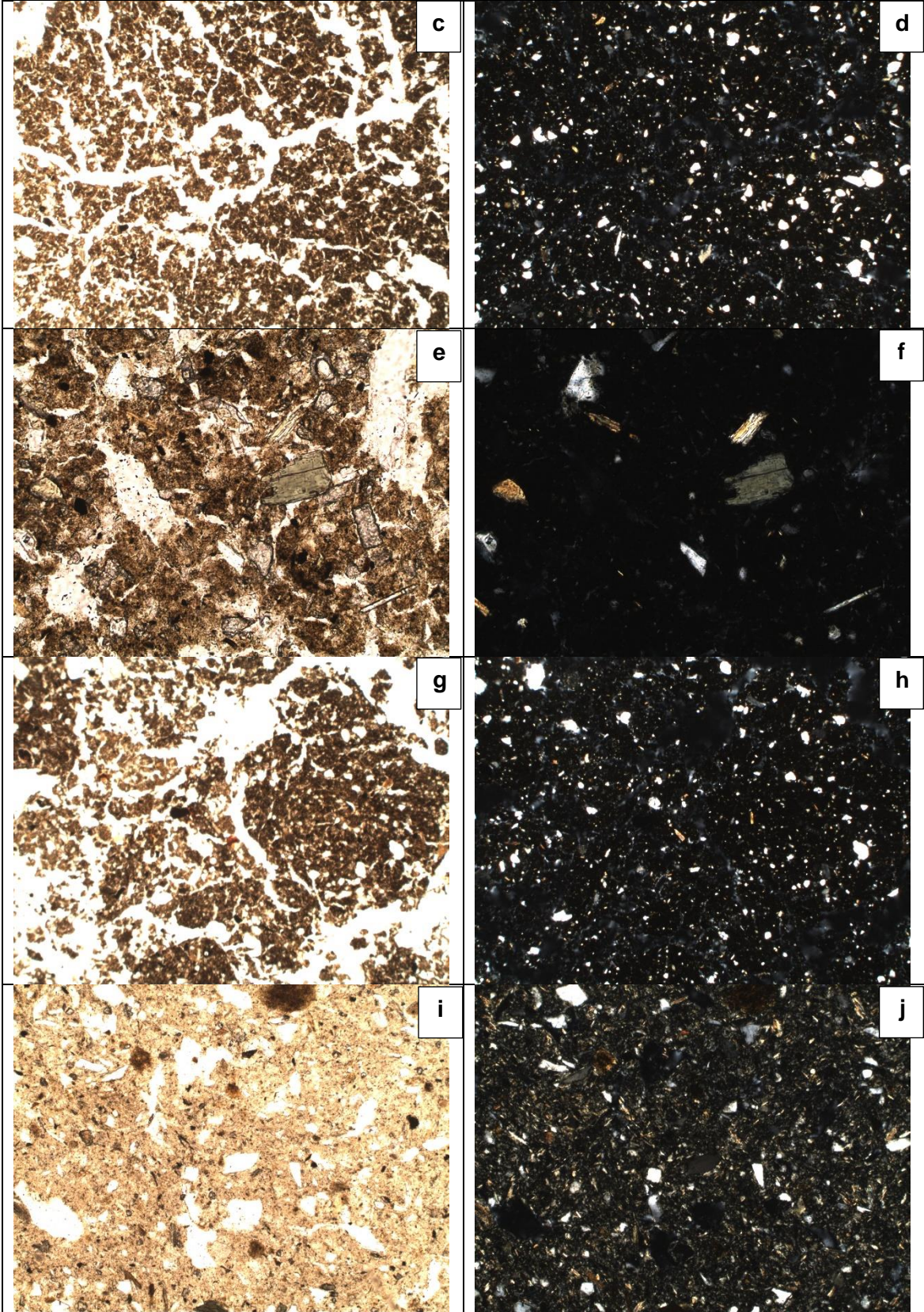
del suelo, adicionalmente, altas precipitaciones favorecen la formación de materiales alofánicos con bajas cantidades de Si y Al, dada la rápida salida del Si del suelo por lixiviación.

La presencia de vidrio volcánico en la fracción liviana de arenas y material cristalino en la fracción arcillosa de BL1 y BL2 sugiere que la formación de estos suelos se dio a partir de materiales parentales de con bajos contenidos de Si, tal como lo sugieren Harsh *et al.* (2002), quienes aseveran que suelos derivados de este tipo de materiales tienden a presentar bajas concentraciones de Si en la solución del suelo y por tanto mayor cantidad de alófana e imogolita, en comparación con suelos derivados de materiales parentales con altos contenidos de Si. Por ejemplo, suelos derivados de materiales andesíticos pueden presentar mayores contenidos de imogolitas y alófanas, que suelos derivados de materiales dacíticos. Por otro lado, suelos formados a partir materiales riolíticos (con alto contenido de Si) tienden a reportar presencia de haloisita (Shoji *et al.*, 1993).

La Figura 3 expone las imágenes de las secciones delgadas de los horizontes muestreados en los tres perfiles. Del lado izquierdo se observa la imagen bajo nicoles paralelos (PPL) y del lado derecho bajo nicoles cruzados (XPL).







**Figura 3.** Imágenes de secciones delgadas de perfiles BL1, BL2 y BL3 del lote experimental del cultivo de mora. a) Horizonte 0-11 cm BL1 PPL. b) Horizonte 0-11 cm BL1 XPL. c) Horizonte 11-48 cm BL1 PPL. d) Horizonte 11-48 cm BL1 XPL. e) Horizonte 48-78 cm BL1 PPL. f) Horizonte 48-78 cm BL1 XPL. g) Horizonte 0-27 cm BL2 PPL. h) Horizonte 0-27 cm BL2 XPL. i) Horizonte 0-32 cm BL3 PPL. j) Horizonte 0-32 cm BL3 XPL.

El principal componente mineral distinguible en las imágenes de las secciones delgadas corresponden a cuarzo (granos de color transparente en las imágenes tomadas con luz polarizada-XPL), que se caracteriza por su bajo relieve, por ser incoloro y por no presentar pleocroísmo, ni indicios de alteración como exfoliación (Loaiza *et al.*, 2015). En el último horizonte del perfil BL1 se distingue el vidrio volcánico (parte central izquierda de la Figura 3e y Figura 3e) de color naranja, característica predominante cuando este material se encuentra en ambientes bien drenados y con buena aireación, y su alteración tiende a formar alófanas (Stoops, 2007). En este mismo horizonte se observa en la parte central de la imagen un grano de hornblenda, de color marrón verdoso.

La microestructura para todos los horizontes es blocosa subangular con fuerte grado de desarrollo. La abundancia de poros (principalmente planos y canales), que se expresa como la proporción con respecto a la masa sólida, se encuentra entre 30 y 70 %, siendo mayor en BL2. La distribución relacionada g/f, es la disposición de unidades de contextura individuales en relación con unidades menores y sus poros asociados, se trata de un tipo especial de distribución en el que se consideran elementos gruesos y finos de un material edáfico (Stoops, 2003). Para todos los horizontes muestreados el modelo de distribución relacionada g/f es porfírica de doble espaciado, lo que hace referencia a que la distancia entre los granos más gruesos corresponde a una o dos veces su diámetro medio (Vepraskas, 2003). Este modelo de distribución es común en suelos ricos en arcilla (Loaiza *et al.*, 2015).

El material fino de la masa basal es casi siempre demasiado fino para ser identificado mediante técnicas ópticas, las únicas características que pueden ser determinadas son el color, la limpidez o grado de transparencia y en algunos casos los colores de interferencia, según la disposición de las capas de arcilla en la lámina delgada (Loaiza *et al.*, 2015).

El color de la masa basal va de pardo amarillento claro (Figura 3i) a pardo oscuro (Figura 3a), indicando la presencia de arcillas, óxidos de hierro, materiales amorfos y materia orgánica en distintas proporciones (Stoops *et al.*, 2010). La limpidez del material fino para todos los horizontes se caracteriza por ser moteada- punteada, que hace referencia a la presencia de partículas finas y gruesas las cuales pueden ser materia orgánica humificada o minerales oscuros. El estudio de materiales orgánicos en láminas delgadas se ve limitado por el color oscuro que presentan bajo luz polarizada, lo que impide su distinción de minerales oscuros (Vepraskas, 2003). Algunos componentes orgánicos gruesos fueron distinguibles únicamente en el horizonte superficial de BL1 (Figura 3a), posiblemente relacionado con tejido vegetal de la parte radical en descomposición.

## **5.2 Interrelación de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo**

Mediante el análisis descriptivo univariable y el uso de ACP convencional y ACP-PG se pudo llegar a establecer algunas relaciones entre las variables estudiadas.

### **5.2.1 Análisis descriptivo univariable**

Las principales medidas descriptivas univariables se presentan en el Anexo F. Con base en los límites de coeficientes de variación propuestos por Warrick y Nielsen (1980) para la clasificación de las propiedades del suelo, se tiene que el pH presenta variación baja (alrededor de 12%). Al respecto Arrouays *et al.* (2000), afirman que el pH es poco afectado por factores extrínsecos al suelo, como la aplicación de fertilizantes. Arshad y Coen, (1992) y Doran *et al.* (1994), reportan que el pH muestra cambios permanentes luego de 5 años de manejo continuo de la fertilidad del suelo. Los valores oscilaron entre 3,8 (extremadamente ácido) y 6,9 (neutro), lo que interfiere directamente en la disponibilidad de los elementos nutrientes para las plantas Hoeft *et al.* (2000), específicamente, los cationes de cambio (Oliveira *et al.*, 1999; Ochoa *et al.*, 2003). Particularmente, el P puede verse afectado por el pH del suelo, ya que a pH alcalino, el fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) tiende a reaccionar rápidamente con Ca y Mg para formar compuestos de baja solubilidad, y a pH tendiente a la acidez, se inclina a reaccionar con Al y Fe para formar compuestos insolubles. A partir de lo anterior se puede explicar la alta variación que presentó el contenido de P en el suelo (>60%).

Ligeros cambios de pH afectan la disponibilidad de micronutrientes. Se reporta que la mayoría de estos elementos tienden a estar menos disponibles cuando el pH es alcalino, con excepción del Mo (IPNI, 2010). La conductividad eléctrica, el contenido de MO y B presentaron variación media (12 a 60%).

Respecto a las relaciones iónicas, la relación Ca/B que en promedio se encuentra cercana a 7000, se traduce en una posible deficiencia de B en el suelo, tomando en cuenta que Castro y Gómez (2010), reportan un rango de 1000 a 2000 como óptimo para este parámetro. Con relación a Mg/K (promedio de 9,3) puede estar presentándose deficiencia de K ya que se reporta un rango ideal de entre 3 y 4.

### 5.2.2 Análisis descriptivo multivariable

Los resultados del ACP global se listan en la Tabla 6. Tomando en cuenta que los valores absolutos de las cargas son directamente proporcionales a la importancia de cada variable dentro del componente, se presentan las cargas y se resaltan las de mayor valor absoluto en los componentes extraídos.

**Tabla 6.** Resumen del análisis de componentes principales global extraído de las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth) en Silvania, Cundinamarca.

	Componentes					
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6
Autovalores	6,62	2,64	2,09	1,95	1,46	1,15
Porcentaje de variación total explicada	30,08	12,02	9,54	8,89	6,67	5,22
Porcentaje acumulado de variación explicada	31,55	41,10	51,64	60,53	67,21	72,43
Cargas						
PROD	0.0868	0.0121	<b>0.3646</b>	0.2875	0.2046	-0.1350
pH	<b>-0.3490</b>	0.1640	0.0659	-0.0841	0.0578	0.1006
CE	-0.1807	<b>-0.3821</b>	0.0926	-0.0252	-0.0939	-0.0094
MO	0.0847	-0.1979	-0.1531	0.2238	-0.0797	0.0651
P	-0.1104	-0.1073	-0.0922	0.0117	0.2151	<b>-0.4868</b>
S	-0.1221	-0.2210	0.0436	0.0515	-0.0572	<b>-0.4603</b>
Acl (Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> )	<b>0.2861</b>	-0.2859	0.0333	0.2942	0.1069	0.0986
Al	<b>0.2895</b>	-0.2729	0.0445	0.2898	0.1019	0.0722

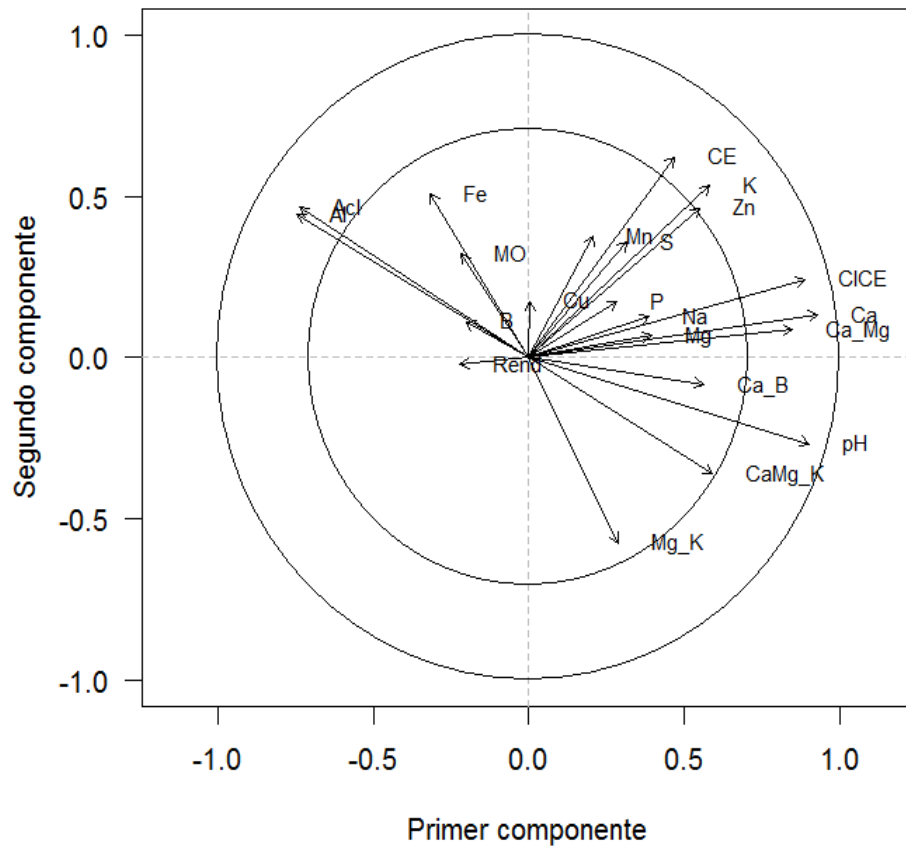
Ca	<b>-0.3604</b>	-0.0823	0.1140	0.1073	0.1127	0.0899
Mg	-0.1529	-0.0417	-0.0926	0.0110	-0.0037	<b>0.3181</b>
K	-0.2254	<b>-0.3274</b>	0.1432	-0.2888	-0.0825	0.1141
Na	-0.1506	-0.0791	0.1845	<b>0.3258</b>	-0.4077	-0.0792
CICE	<b>-0.3436</b>	-0.1492	0.1236	0.1429	0.1198	0.1154
Fe	0.1232	-0.3125	-0.1565	0.2741	0.1562	<b>0.3354</b>
Mn	-0.0806	-0.2317	<b>-0.5100</b>	-0.0748	-0.0267	-0.1558
Zn	-0.2132	-0.2853	-0.1556	-0.0717	0.1033	-0.0916
Cu	-0.0014	-0.1076	<b>-0.4998</b>	-0.1310	0.0382	-0.1451
B	0.0786	-0.0691	0.1356	-0.2078	<b>0.5557</b>	0.1105
Ca/Mg	<b>-0.3288</b>	-0.0538	0.0994	0.0753	0.2628	0.0927
Ca+Mg/K	-0.2286	0.2201	-0.1504	<b>0.3403</b>	0.3067	-0.0092
Mg/K	-0.1113	<b>0.3523</b>	-0.3303	<b>0.3297</b>	0.1499	-0.0013
Ca/B	-0.2173	0.0505	-0.0851	<b>0.2970</b>	-0.3694	0.0596

CP: Componente Principal.

Se obtuvo que los seis primeros componentes, con autovalores superiores a uno, explican más de 70% de la variación en las variables estudiadas y hasta los tres primeros componentes explican más de 50%. El primer componente (CP 1) explicó el 31,55% de la variación total en los datos y se relacionó con el contenido de Ca, el pH, la CICE, la relación Ca/Mg, el contenido de Al y la acidez intercambiable ( $Al^{3+}+H^{+}$ ). Este componente puede ser analizado como un factor asociado a la acidez del suelo y la interpretación simultánea del pH y el contenido de Ca, concuerda con lo reportado por Islabao *et al.* (2013), quienes encontraron que esta misma relación se soporta en la disponibilidad del elemento según el pH del suelo. El contenido de Al y la acidez intercambiable se relacionaron negativamente con el resto de variables, al respecto Lopes y Guilherme (2004) afirman que cuanto más ácido es un suelo, mayor es el contenido de  $Al^{3+}$  y la acidez intercambiable, los niveles de Ca, Mg y K son más bajos y por tanto es menor la CICE.

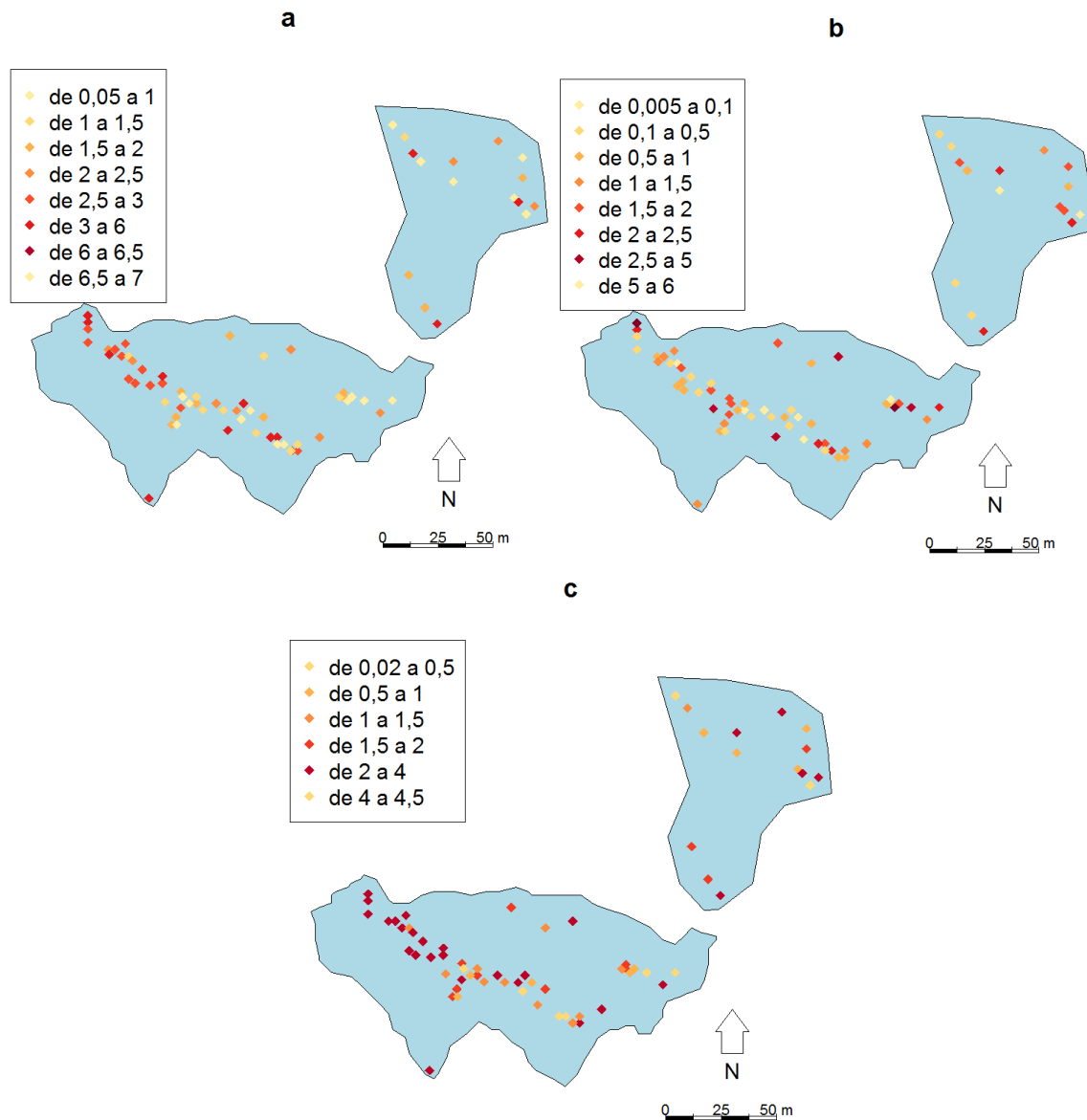
La contribución del segundo componente al total de variación es de 12%, este articuló la relación catiónica Mg/K, el contenido de K y la conductividad eléctrica (Figura 4). El contenido de K y la conductividad eléctrica se relacionaron directamente, posiblemente porque una de las principales sales que se encuentran en los suelos, corresponden a cloruros y sulfatos de potasio (Munns *et al.*, 2005), por el contrario, estas dos variables se enlazan inversamente con la relación Mg/K, dado que a mayores contenidos de K, la relación de los cationes en el suelo disminuye.

El tercer componente con menos poder interpretativo en comparación a los anteriores, explicó 9,54% de la variación total en los datos y se relacionó con la productividad del cultivo, el contenido de Cu y Mn en el suelo. La productividad presenta carga positiva, mientras que las cargas asociadas a ambos elementos químicos son de signo negativo, lo que implica que un aumento en los contenidos de Mn en suelo podría estar relacionado con baja productividad, que a su vez es común en suelos ácidos en los que la toxicidad por Mn reduce la actividad fotosintética y disminuye la toma de otros elementos de mayor importancia como el Ca, Mg, Zn y Fe (Roholla *et al.*, 2011). Con relación al Cu, la toxicidad por este elemento causa daños en el aparato fotosintético de la planta y múltiples afectaciones a nivel celular, reduciendo de esta manera la productividad en sistemas de cultivo (Yruela, 2005).



**Figura 4.** Correlación entre las variables de suelo y los dos primeros componentes extraídos a partir de las propiedades químicas de suelo y la productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth).

Las puntuaciones de los tres primeros componentes globales extraídos se ilustran en la Figura 5.

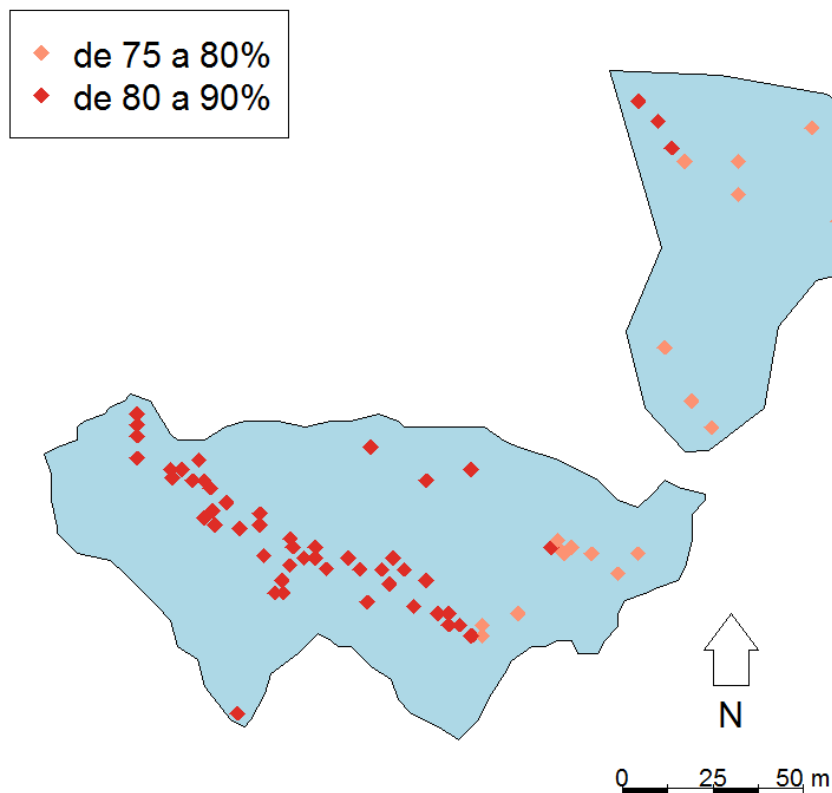


**Figura 5.** Rangos de puntuaciones en cada componente principal extraído a partir de las propiedades químicas de suelo y la productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth) en Sylvania, Cundinamarca. a) Primer componente. b) Segundo componente. c) Tercer componente.

Aunque no es evidente una tendencia geográfica, la Figura 5 sugiere variaciones en los atributos analizados; no obstante, a partir de las puntuaciones en cada componente no es

posible explicar cuáles variables representan las mayores variaciones en zonas particulares (Kumar *et al.*, 2012). El ACP global permitió identificar las principales variables relacionadas con la dinámica de las propiedades del suelo y la productividad del cultivo de mora, y ha sugerido la existencia de complejas relaciones entre estas variables, el manejo del cultivo y las condiciones naturales del suelo; sin embargo, estos resultados son globales y por tanto no permiten explicar las variaciones espaciales a escala local. Las variaciones locales lograron descubrirse luego del uso del ACP-PG.

Dado que los tres primeros componentes extraídos con el análisis global representaron más del 50% de la variación total de los atributos estudiados, el número de componentes extraídos mediante el ACP ponderado geográficamente también fue de tres. La Figura 6. ilustra la distribución espacial del porcentaje de variación total explicada por los dos primeros componentes ponderados geográficamente.

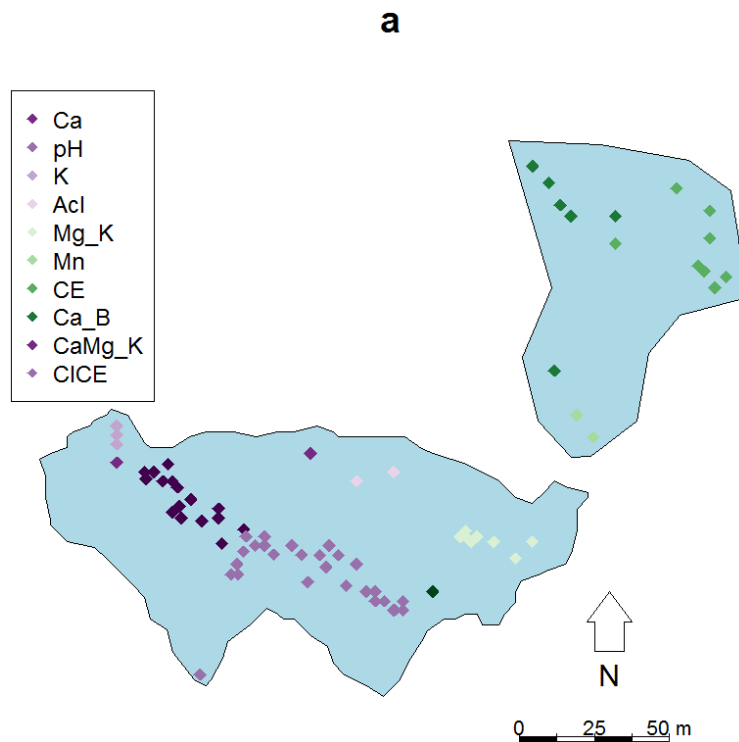


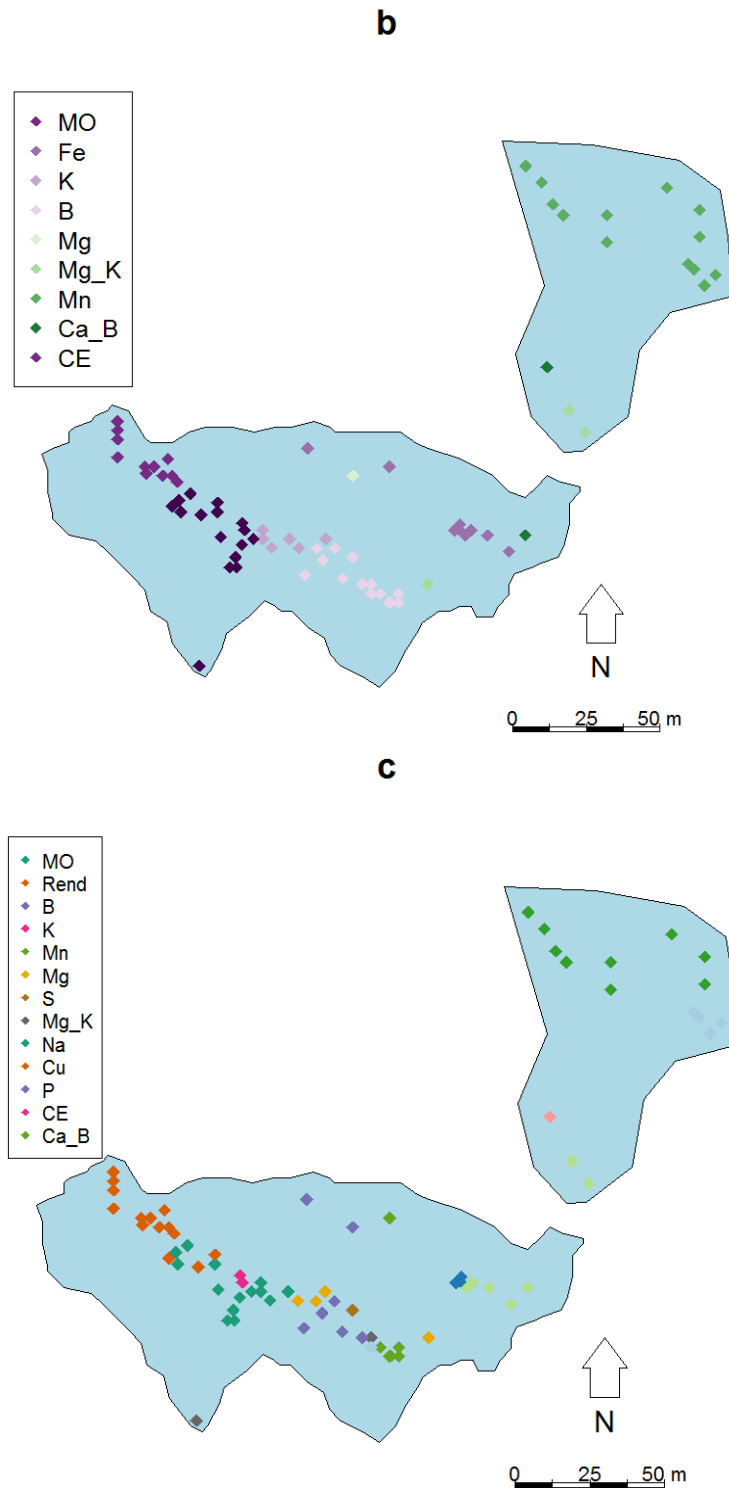


**Figura 6.** Porcentaje de variación total acumulada en los dos primeros componentes ponderados geográficamente para cada uno de los puntos georreferenciados en el lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Los porcentajes mapeados varían entre 76 y 87% para los dos primeros componentes extraídos. Altos porcentajes se localizan en la parte sur del lote, mientras que los bajos se presentan hacia el norte. El comportamiento observado a partir de los valores obtenidos de variación explicada, sugiere que las interacciones entre las variables se dan a escala, como lo sostienen Li *et al.* (2015).

La distribución de las variables con la mayor carga, en valor absoluto, en los tres componentes ponderados geográficamente, se ilustra en la Figura 7.





**Figura 7.** Variables con mayor carga en cada punto georreferenciado para los primeros tres componentes ponderados geográficamente, extraídos a partir de las propiedades

químicas de suelo y productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth) en Sylvania, Cundinamarca. a) Primer componente. b) Segundo componente. c) Tercer componente.

En el componente uno (Figura 7a), domina el contenido de Ca, K, Mn, el pH y la relación Ca/B. El ACP global y el ponderado geográficamente, concuerdan en que el primer componente se encuentra representado por el pH y el Ca principalmente. En el componente dos (Figura 7b), el contenido de Fe, MO, Mg y K domina en la mayoría de puntos de muestreo, así como también la relación Ca/B. La Figura 7c presenta a la productividad del cultivo como parámetro dominante de la variabilidad representada por el componente tres, seguido por el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica. En menor proporción se encuentra el contenido de B, P y Mn en el suelo.

A partir de estas dinámicas, cabe anotar que la tendencia de agrupamiento de las variables de mayor relevancia en cada componente demarca zonas del lote con características homogéneas. Se distinguen tres zonas, una primera localizada hacia la parte occidental, la cual coincide con el bloque experimental número 1 (BQ1), una segunda zona localizada hacia la parte oriental, que coincide con el bloque número 3 (BQ3), y una zona central, en la parte sur del lote del cultivo, que corresponde al bloque número 2 (BQ2), según el arreglo en campo del experimento. Las características físicas, químicas y mineralógicas de los bloques, revisadas anteriormente a partir de la descripción en campo del perfil BL2 y los resultados de análisis de laboratorio para los perfiles BL1, BL2 y BL3, se constituyen en herramientas fundamentales para poder dar soporte a las asociaciones entre variables halladas con el ACP-PG. Kumar *et al.* (2012), indican que el tipo de minerales presentes puede ser uno de los aspectos determinantes de la dinámica de los elementos en el suelo.

En BQ1 se destacan los contenidos de Fe, MO, Ca y la productividad del cultivo. La relación Fe y el contenido de MO se da principalmente en suelos derivados de cenizas volcánicas, que se caracterizan por presentar una cantidad importante de microagregados estables en agua y formación de complejos con la materia orgánica y los minerales amorfos de Fe y Al (Shoji *et al.*, 1993). Castro Filho (1998), reporta que la agregación del suelo está influenciada por la capacidad de floculación de los cationes presentes, la dinámica del Al en función del pH, la mineralogía de suelo, los tipos de ácidos orgánicos presentes, la interacción o formación de enlaces entre partículas de arcilla, cationes polivalentes y la materia orgánica, actividad microbiana y los tipos de microorganismos involucrados.

Particularmente, el Ca juega un papel importante en la floculación de la arcilla (Kjellander *et al.*, 1988, Six *et al.*, 2004), es considerado un elemento importante para la estabilización de la materia orgánica del suelo y la agregación debido a la formación de complejos de arcilla- cationes polivalentes- materia orgánica (Clough y Skjemstad, 2000). BL1 muestra precisamente la mayor proporción de agregados de diámetro inferior a 0,25 mm (21%), en comparación con BL3 y BL2, que cuentan con 15,3% y 17,3%, respectivamente, y el mayor porcentaje de porosidad total con 81%. Cabe resaltar que BL1 presenta altos contenidos de vidrio volcánico, como se mencionó en la descripción de suelos expuesta anteriormente, (que en etapas avanzadas de meteorización y en condiciones de alta precipitación, se transforma en minerales amorfos) y de hiperstena y magnetita (minerales con altos contenidos de hierro) (Shoji *et al.*, 1993; Lizcano *et al.*, 2006).

En la BL2 las variables con mayor importancia fueron el contenido de K, Mg, B y Mn. El sinergismo entre K y Mg podría relacionarse con la mineralogía del bloque. Esta zona se caracteriza por altos contenidos de cuarzo en la fracción liviana de las arenas y material amorfo en las arcillas. La función probable de elementos como el K y el Mg en la red cristalina del cuarzo tienden a confirmar la relación encontrada. Las impurezas más frecuentes,  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$ , sustituyen al  $Si^{4+}$  en el centro del tetraedro de cuarzo, originando  $AlO_4^-$  o  $FeO_4^-$  (Götze, 2012). Estas sustituciones heteroeléctricas en el cuarzo causan cambios estructurales de tipo  $[AlO_4/Catión\ positivo]^0$  y  $[FeO_4/Catión\ positivo]^0$  (Götze, 2009), y el exceso de cargas negativas es balanceado mediante la unión de cationes alcalinos, principalmente  $K^+$  y metales alcalinotérreos como el  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  (Martín-García *et al.*, 2014).

En BL3 se destaca la relación Ca/B, el contenido de K, Mn, P y la conductividad eléctrica. El contenido de K y la conductividad eléctrica se relacionaron directamente, dado que una de las principales sales que se encuentran en los suelos, corresponden a cloruros y sulfatos de potasio (Munns *et al.*, 2005). Tariq y Mott (2006) estudiaron la influencia de la relación Ca/B y la solubilidad de algunos elementos en el suelo. Con relación al K, sugieren una relación positiva, contrario a lo encontrado con respecto a P. La relación del contenido de Mn y Ca/B, puede explicarse a partir de la dinámica del pH en el suelo. La disminución del pH y consecuente aumento de la relación Ca/B se debe a la liberación de cationes en la solución como resultado de la mineralización de la materia orgánica, a su vez esta baja

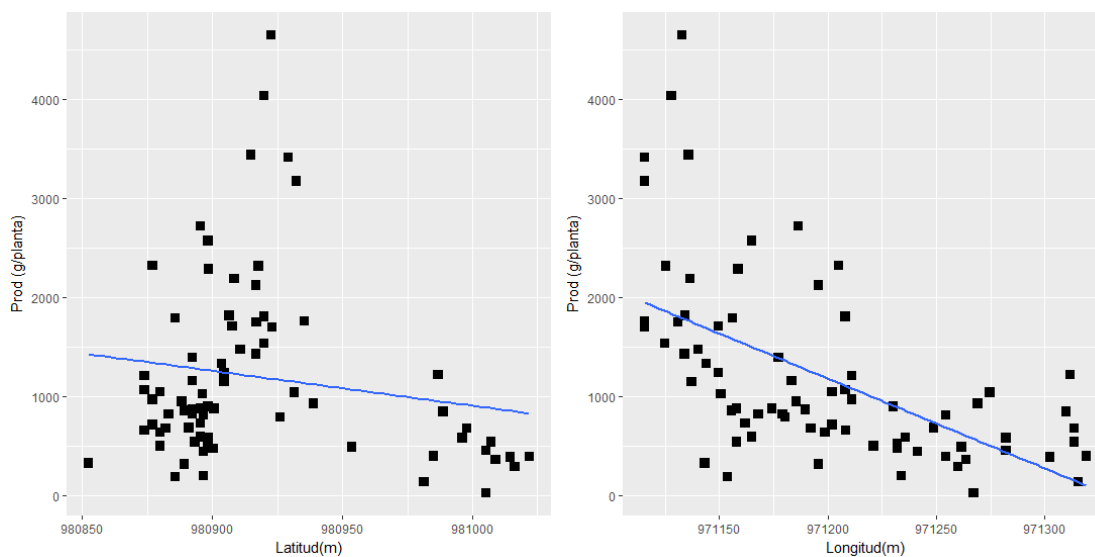
en el pH está acompañada de aumento en los contenidos de  $Mn^{2+}$  en la solución del suelo (Curtin y Smillie, 1983; Tariq y Mott, 2006).

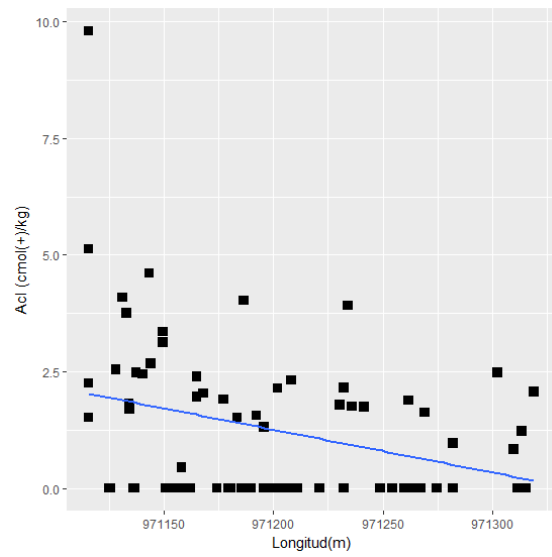
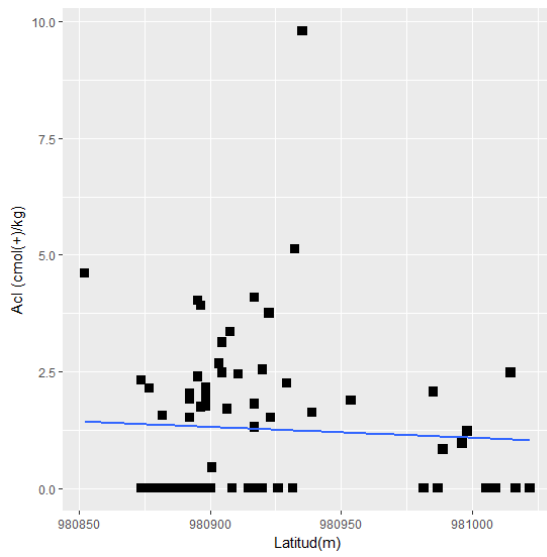
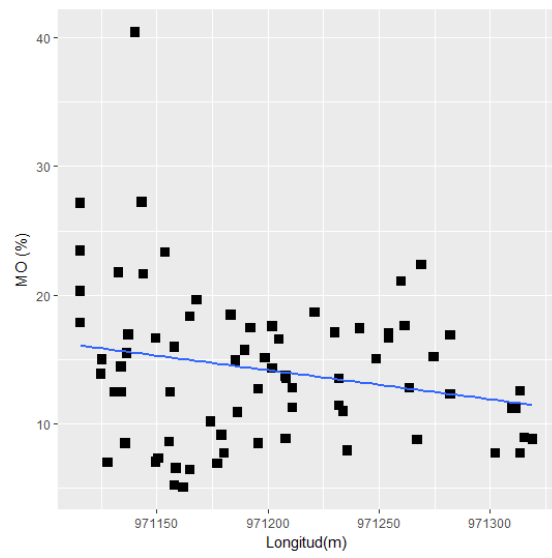
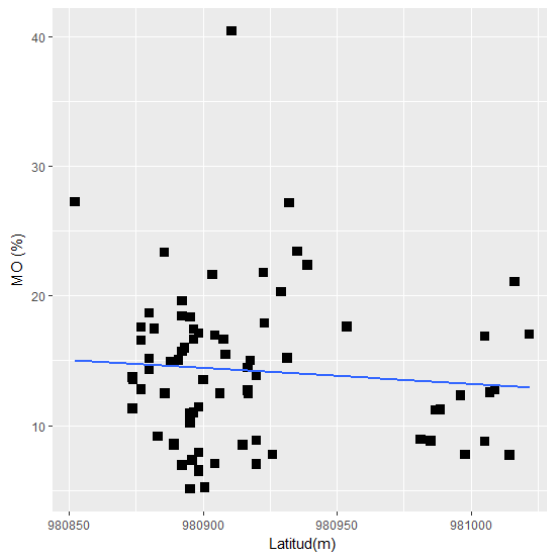
## 5.3 Efecto de las dosis de N, P, K y Ca sobre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo

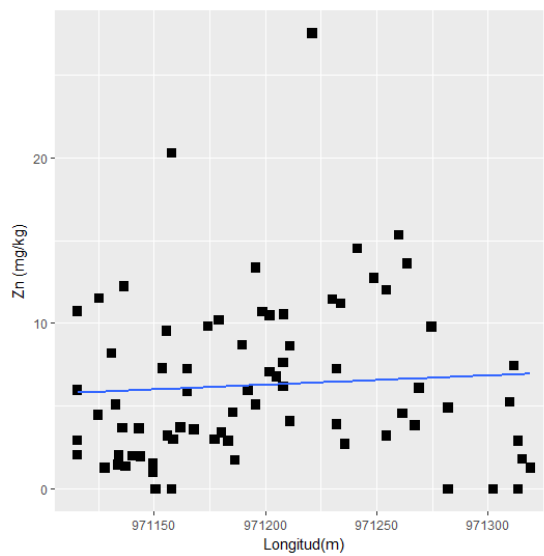
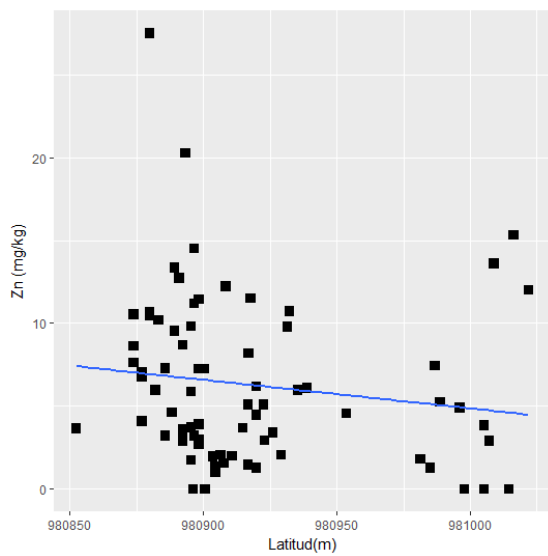
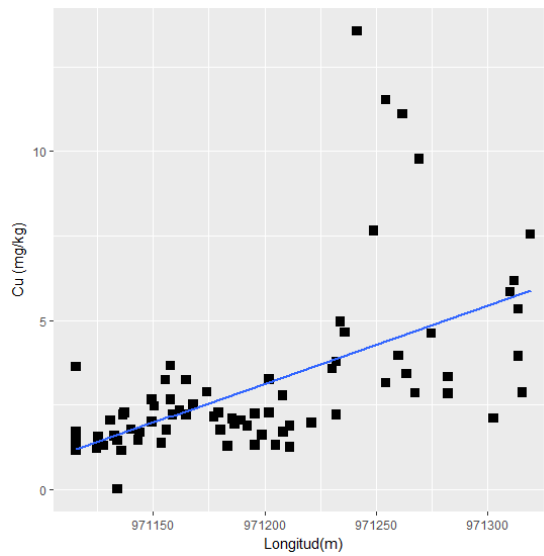
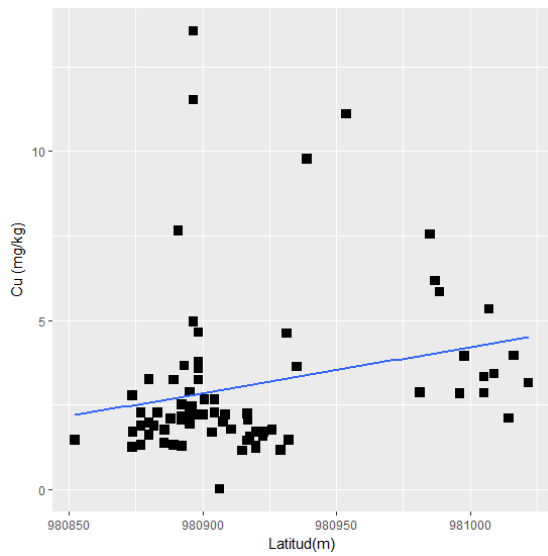
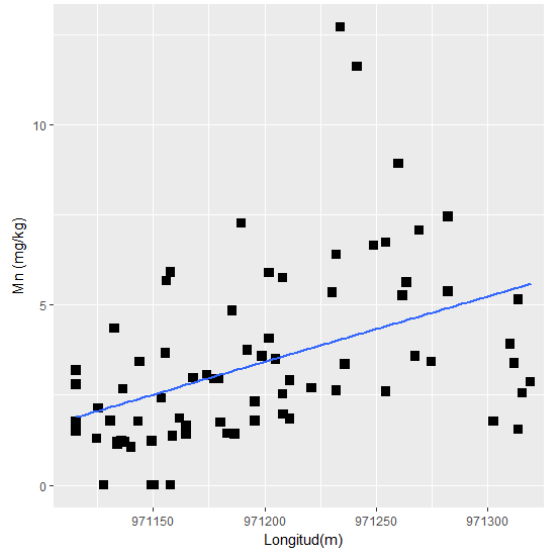
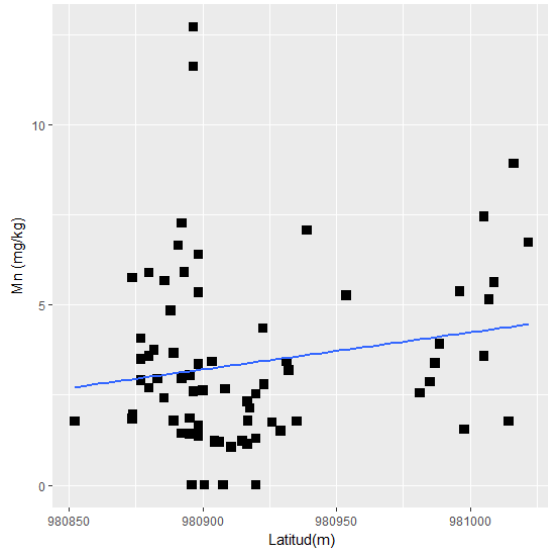
### 5.3.1 Análisis espacial de datos

Luego de realizar el procesamiento descriptivo de los datos y de analizar las relaciones encontradas y la posible influencia de las condiciones de los bloques sobre las mismas, se exponen los resultados del análisis inferencial que permite confirmar o rebatir asociaciones descritas.

De acuerdo a los dispersogramas obtenidos, las variables que mostraron tendencia espacial fueron la productividad del cultivo, el contenido de materia orgánica del suelo, la acidez intercambiable, el contenido de Mn, Cu y Zn. La Figura 8 presenta los gráficos de dispersión que contrastan cada variable mencionada y las coordenadas  $x$  e  $y$ .







**Figura 8.** Dispersogramas de variables que presentaron tendencia espacial de acuerdo a la ubicación de los puntos de muestreo en el cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Gráficamente, se aprecian tendencias más claras entre las variables y los valores en  $x$  de las coordenadas proyectadas. Los contenidos de micronutrientes en el suelo (Cu, Mn y Zn) se relacionaron inversamente con los valores de las coordenadas planas en  $x$ , es decir sus valores son mayores en la parte occidental del lote y van disminuyendo a medida que se desplaza hacia el oriente, contrario a lo que sucede con la acidez intercambiable, el contenido de materia orgánica y la productividad del cultivo, que aumentan sus valores de occidente a oriente.

Para las demás variables (pH, conductividad eléctrica, contenido de P, S Ca, Mg, K, Na, capacidad de intercambio catiónico, contenido de Fe, B y las relaciones iónicas) se efectuó un análisis multivariante no espacial de la información, ya que no se presentaron tendencias claras en sus dispersogramas.

Con base en estos resultados sobre el comportamiento de los datos en el espacio geográfico, se realizó el ajuste de modelos de tendencia de superficie entre las coordenadas proyectadas de los sitios de muestreo y los variables relacionadas anteriormente. Se ajustaron modelos de regresión local de segundo orden, por tanto no existe una única ecuación que represente el comportamiento del atributo en función de su ubicación geográfica, ya que mediante esta técnica se obtienen tantas ecuaciones como puntos de muestreo existentes en el lote experimental.

La medida de ajuste ( $R^2$ ) y el valor de significancia (p-valor) de los modelos obtenidos se muestran en el Anexo G.

Los modelos ajustados resultaron estadísticamente significativos. El modelo de regresión local para la productividad del cultivo explicó 45% de la variabilidad total de los datos, para el caso del contenido de materia orgánica en el suelo solo explicó 11%. El modelo para acidez intercambiable explicó 18% de la variabilidad de los datos, para los contenidos de Mn, Zn y Cu, 30, 20 y 43%, respectivamente.



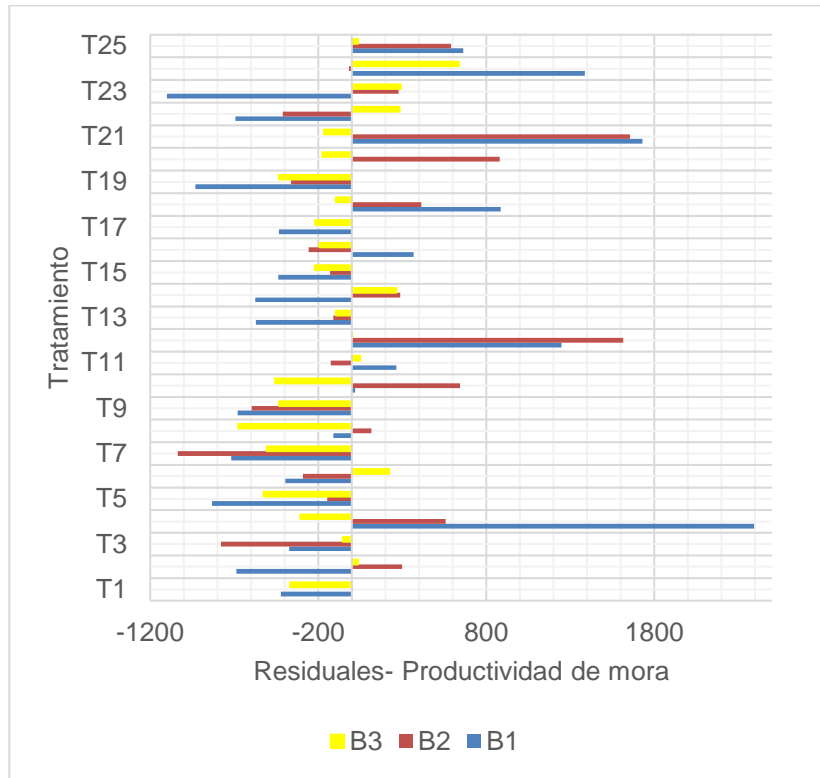
El efecto de los tratamientos sobre los atributos examinados se discutirá a partir del Anexo H, que muestra si después de eliminar la relación espacial de las unidades experimentales, se mantenían los mismos resultados obtenidos con análisis de varianza. Se presentan los grados de libertad, el valor F y la significancia para cada fuente de variación del experimento, tomando las variables originales y considerando los residuales de los modelos ajustados como variables de respuesta. Los resultados completos de los análisis de varianza sobre las variables originales se pueden observar en el Anexo I y la comparación de los efectos de tratamientos sobre residuales y sobre variables originales (Anexo J).

Hubo efecto significativo de los tratamientos sobre la producción de mora cuando el anava se hizo con los resultados de producción originales y con los residuales de los modelos de tendencia de superficie. En la misma tabla se observa que al eliminar la variabilidad espacial en el error experimental, el efecto de los tratamientos sobre la productividad del cultivo se vuelve altamente significativo, por tanto la variabilidad estructurada del error experimental no estaba permitiendo que se expresara del todo el efecto de los tratamientos sobre la variable contemplada (Jaramillo, 2005).

Después de los análisis de varianza se hicieron las correspondientes pruebas de comparación de medias de Tukey al 5% para la variable productividad del cultivo, obteniendo los valores que se exponen en el Anexo J.

En ambos los casos las plantas que recibieron el tratamiento 7 presentan menor producción promedio. El tratamiento 21 contó con las plantas de mayor productividad. Pese a que se eliminó la variabilidad espacial, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (exceptuando el tratamiento 7) aunque si se observó un cambio en su ordenamiento relativo entre los análisis de varianza realizados.

Como resultado de la prueba de aditividad de Tukey (5%) realizada a partir del análisis de varianza sobre los residuales de los modelos de tendencia, se encontró que existe interacción entre bloques y tratamientos ( $p < 0.01$ ). La Figura 9. presenta los promedios de los residuales del modelo de tendencia de superficie para la productividad del cultivo, calculados por tratamientos y por bloques.



**Figura 9.** Promedios por tratamientos y bloques de los residuales del modelo de tendencia de superficie para la variable productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Como evidencia de la interacción de tratamientos y bloques, se tiene por ejemplo que las plantas que recibieron  $43 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  y  $60$  de CaO (tratamiento 21) presentaron el mayor valor de productividad promedio y que el menor valor de productividad se obtuvo de las plantas que recibieron  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $16 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  y  $40$  de CaO (tratamiento 7), no obstante se observa que este tratamiento no se comportó igual en los tres bloques, ya que la productividad de mora de las plantas del bloque 3 que recibieron el tratamiento 21 fue la quinta más baja en relación con los demás tratamientos del mismo bloque. Por su parte, las plantas a las que se les suministró el tratamiento 7 ocuparon el lugar más bajo en el bloque 2 y 3 y el tercero más bajo en el primer bloque. Los valores de productividad por tratamientos y bloques para la variable productividad se muestran en el Anexo K.

Para examinar la interacción con mayor detenimiento, la Tabla 7. presenta las cantidades de cada uno de los nutrientes aplicados en los tratamientos en los cuales se obtuvo los

valores más altos y más bajos de productividad en el cultivo, en cada uno de los tres bloques del experimento.

**Tabla 7.** Tratamientos por bloque con mayor y menor productividad y las correspondientes cantidades aplicadas de cada nutriente en el cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

BLOQUES	TRATAMIENTOS	DOSIS (kg.ha <sup>-1</sup> )			
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
B1	T4*	64,0	16,0	80,0	40,0
B2	T21*	43,0	10,0	71,7	60,0
B3	T24*	43,0	10,0	100,0	88,3
B1	T9 <sup>+</sup>	22,0	4,0	80,0	80,0
B2	T7 <sup>+</sup>	22,0	16,0	120,0	40,0
B3	T7 <sup>+</sup>	22,0	16,0	120,0	40,0

\* Tratamientos que rindieron mayor productividad en gramos de mora por planta. <sup>+</sup> Tratamientos que rindieron menor productividad en gramos de mora por planta.

No hubo un tratamiento con mejores resultados en todo el lote de cultivo, por el contrario, distintos tratamientos con cantidades variables de los elementos químicos aplicados rindieron altos valores de productividad, según el bloque en el que estaban ubicados. Para el caso de P puede notarse que las plantas del bloque 1 que mostraron mayor productividad recibieron mayor cantidad del nutriente en comparación con las plantas con productividad más alta en los bloques 2 y 3. Lo anterior debido a que en el bloque 1 pudo ser diferente la dinámica del elemento en el suelo, posiblemente en esta zona del lote alguna parte del P aplicado en la fertilización es retenido y fijado por los constituyentes minerales del suelo, por tanto las dosis empleada para obtener la mayor productividad tuvo que ser alta. Tening *et al.* (2013), afirman que la fijación de P en el suelo depende del pH del mismo, el contenido de materia orgánica y la constitución mineralógica de los colides del suelo. De acuerdo a la caracterización de suelos, el bloque 1 presenta mayor cantidad de material no cristalino en la fracción arcillosa, particularmente en el horizonte superficial, y a su vez un pH menor, lo cual conllevó a de fenómenos de fijación de P en el suelo. Al respecto, Parfitt (1989), afirma que los iones fosfato cargados negativamente (por ejemplo, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) son retenidos fuertemente en suelos de carga variable a pH ácido y que esta fijación disminuye con el incremento del pH. En suelos con presencia de cenizas

volcánicas, compuestos como las alófanos y los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio pueden adsorber grandes cantidades de fosfatos (Vacca *et al.*, 2003).

Lo anterior muestra además, que el suministro de P puede tener efecto variado sobre la respuesta del cultivo, dependiendo de la misma especie y de las condiciones ambientales (Karamanaos *et al.*, 2014). Comúnmente, el P se une con óxidos e hidróxidos de Fe y Al a través de mecanismos de adsorción físico-química y como resultado de este proceso, solamente del 10 a 30% del P aplicado puede ser tomado por la planta (Kochian *et al.*, 2004). El P inmovilizado es de baja solubilidad y difícilmente es liberado a la solución del suelo nuevamente, lo cual sugiere que la fertilización fosfórica química como única fuente de suministro de P en los suelos estudiados, puede no ser la mejor opción con relación al costo y a la producción obtenida en el cultivo de mora. Ahora bien, en ausencia de P suficiente para el desarrollo de la planta de mora en estado productivo, se han reportado algunos efectos visuales como tallos y ramas muy delgados, ya que causa escaso desarrollo de los tejidos vasculares, tanto del xilema como del floema, y en consecuencia los frutos obtenidos son de menor tamaño (González *et al.*, 2010). Pese a esta condición, puede que el efecto no esté siendo tan marcado como debería ser en este tipo de suelos debido a la forma de aplicación del fertilizante que contribuye a reducir la inmovilización del P en el suelo. La toma de P por parte de los cultivos puede mejorar con el método adecuado de aplicación del fertilizante, ya que en suelos que tienen una alta capacidad de fijación, la aplicación en banda mejora la toma del elemento en comparación con la aplicación esparcida. Lo anterior se da como consecuencia de que al concentrar el P en un pequeño volumen de suelo, los sitios de unión del elemento con las partículas minerales se saturan, aumentando la movilidad del ion fosfato en la solución del suelo y su mayor difusión hacia la raíz (Balemi y Negisho, 2012).

Algo similar ocurrió con el K cuando se comparan los tratamientos de mayor productividad en los bloques. Se observan variaciones importantes entre las dosis aportadas del elemento en cada bloque y se tiene que en el bloque 3 la cantidad de K aportada es mayor. Lo anterior puede estar relacionado con la disponibilidad del elemento, dada la dinámica existente entre las distintas formas de K en el suelo. Cuando un fertilizante potásico es adicionado al suelo una fracción del K aplicado incrementará el K soluble, otra porción será adsorbida en sitios de intercambio y una última parte se fijará en formas no intercambiables

que se equilibraran rápidamente con el K soluble (Bertsch y Thomas, 1985). Según Goli-Kalanpa *et al.* (2008), la distribución del K suministrado en las tres formas mencionadas, particularmente como K fijado, desempeña un papel fundamental en el sistema suelo-planta, influyendo en la efectividad de la fertilización.

La mineralogía de suelo, específicamente, el tipo de arcilla predominante es considerado el aspecto dominante en el proceso de fijación de K. En general, la illita y la vermiculita presentan alta capacidad de fijación del elemento, mientras que la montmorillonita y la caolinita tienen baja capacidad (Shaviv *et al.*, 1985; Conti *et al.*, 2001; Goli-Kalanpa *et al.*, 2008). El bloque 3, en el que se aplicó la mayor cantidad de K, se caracteriza por presentar mayores cantidades de integrados 2:1 y 2:2 en la fracción arcillosa, lo cual implica fijación de K. Sumado a estas condiciones, el pH del suelo pudo condicionar la fijación del K, dado que a valores entre 2,5 y 5,5 la fijación aumenta considerablemente (Sparks, 2001). González *et al.* (2010), reportan que en etapa productiva del cultivo de mora sin espinas, el bajo suministro de potasio a la planta ocasiona la obtención de frutos muy pequeños en la cosecha, lo cual deja ver la importancia de este elemento en el transporte de fotoasimilados, ya que la acumulación de K en el floema es el prerequisite fundamental para lograr establecer y mantener un alto potencial osmótico y así aumentar las tasas de transporte de compuestos de importancia desde la raíz, hasta las hojas jóvenes y frutos (Marschner, 2012).

Este comportamiento de la productividad de acuerdo a tratamientos y bloques, derivado de la influencia de las características mineralógicas del suelo, principalmente, puede ser el punto de partida para el ajuste de planes de fertilización adecuados para el cultivo de acuerdo a la zona donde se encuentre, de tal manera que se tenga en cuenta que el P puede ser fijado por materiales alofánicos presentes en la fracción arcillosa del suelo, como resultado de la alteración del vidrio volcánico debido a las condiciones de alta precipitación, y que esta condición puede contrarrestarse con la aplicación del fertilizante en banda alrededor de la planta. Así mismo, es importante considerar que la aplicación de K y Ca puede verse condicionada por el tipo de mineral arcilloso presente en la zona, ya que arcillas 2:1 y 2:1:1 pueden adsorber estos elementos e inmovilizarlos para que puedan ser tomados por la planta.

Con relación a los demás atributos incluidos en el análisis espacial de la información (contenido de materia orgánica, acidez intercambiable y contenido de micronutrientes Zn, Cu y Mn en suelo) no se presentaron diferencias entre tratamientos cuando se analizaron las variables originales y tampoco cuando se emplearon los residuales, por tanto puede decirse que este resultado no fue consecuencia del enmascaramiento del efecto de tratamientos por la variabilidad estructurada del error experimental, como si sucedió con la productividad del cultivo. Esta usencia de efecto pudo deberse al corto tiempo de evaluación de estas variables. Con respecto al contenido de materia orgánica en el suelo, los valores mínimos están asociados a zonas ubicadas hacia el centro del lote (bloque 1 y parte de bloque 2) y los valores máximos hacia los extremos la zona (principalmente bloque 3). Al igual que para el contenido de materia orgánica, para la acidez intercambiable, los valores más altos se presentaron en puntos ubicados en el centro del cultivo (abarcando todo bloque 1 y bloque 2) y los menores valores se localizaron en zonas correspondientes al bloque 3. El comportamiento del contenido de micronutrientes en el lote concuerda en que la zona occidental (bloque 1) presenta mayores valores en comparación con la zona nororiental (bloque 3).

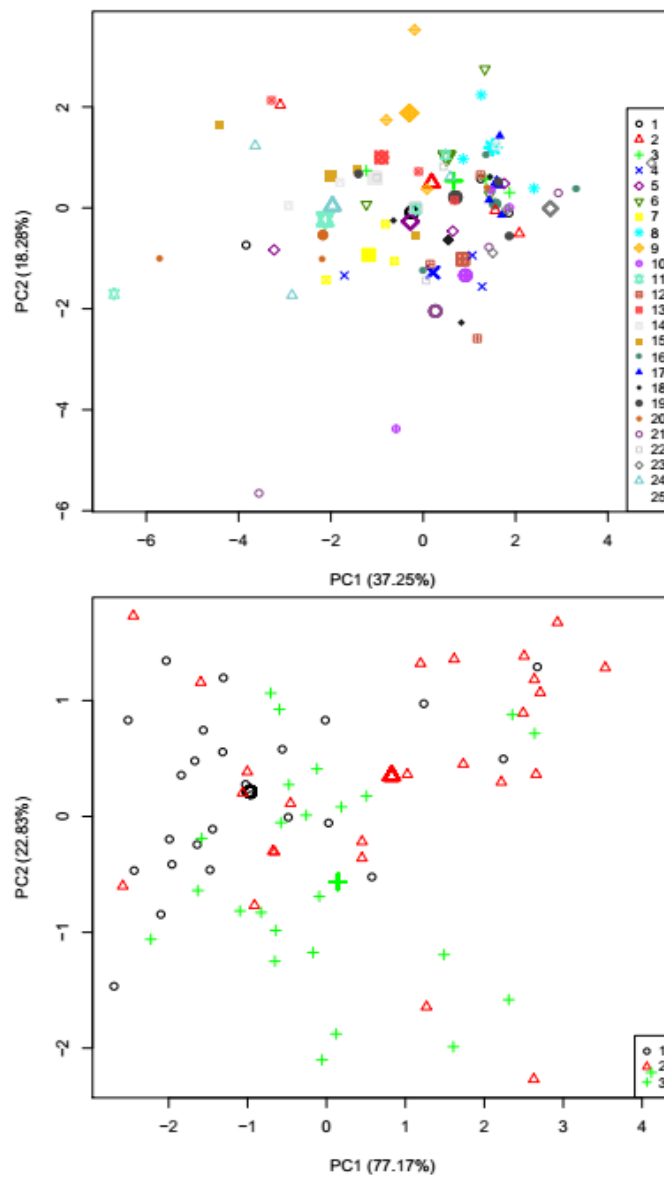
### 5.3.2 Análisis no espacial de datos

Para evaluar el efecto de las distintas dosis aplicadas sobre las propiedades químicas del suelo que no se incluyeron en el acápite anterior sobre análisis espacial (pH, CE, contenidos de P, S, Ca, K, Mg, Na, Fe, Cu, CICE y relaciones catiónicas) se empleó el ANAVA-análisis simultáneo de componentes principales (ASCA, por sus siglas en inglés), como método no paramétrico, dado que los datos no cumplieron los supuestos de normalidad multivariante, ni homogeneidad de matrices de varianzas y covarianzas, para la validación del MANOVA. El máximo número de componentes extraídos para el factor tratamiento fue de 24 y para el factor bloque fue de dos. La variabilidad de los datos explicada por los factores del diseño experimental se pudo obtener separando esta misma en la contribución de los diferentes factores (Tabla 8).

**Tabla 8.** Porcentaje de variación explicada por cada componente extraído según la fuente de variación considerada en el diseño experimental del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Fuente de variación	Componentes									
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10
<b>Tratamientos</b>	37.25	18.28	12.23	7.71	6.69	5.37	4.47	3.39	1.58	1.26
<b>Acumulado</b>	37.25	55.53	67.76	75.47	82.16	87.53	92.00	95.39	96.97	98.23
<b>Bloques</b>	77.17	22.83	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Acumulado</b>	77.17	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-

La variación total de los datos explicada por los seis primeros componentes conformados por el efecto de tratamientos es de casi 90% (Tabla 8), mostrando su eficiencia en comparación al análisis de componentes principales convencional, realizado en el procesamiento descriptivo de la información, ya que en los seis primeros componentes del ACP convencional se explicaba un poco más de 70% de la variación total de los datos, sin tomar en cuenta ningún factor del experimento (Tabla 6). Para apreciar si los factores experimentales tuvieron efecto sobre la agrupación de las variables evaluadas se tiene la Figura 10, que expone los biplot de los resultados del ASCA. En la parte superior de la figura se presenta el biplot para el factor tratamiento y la parte inferior corresponde al factor bloque.



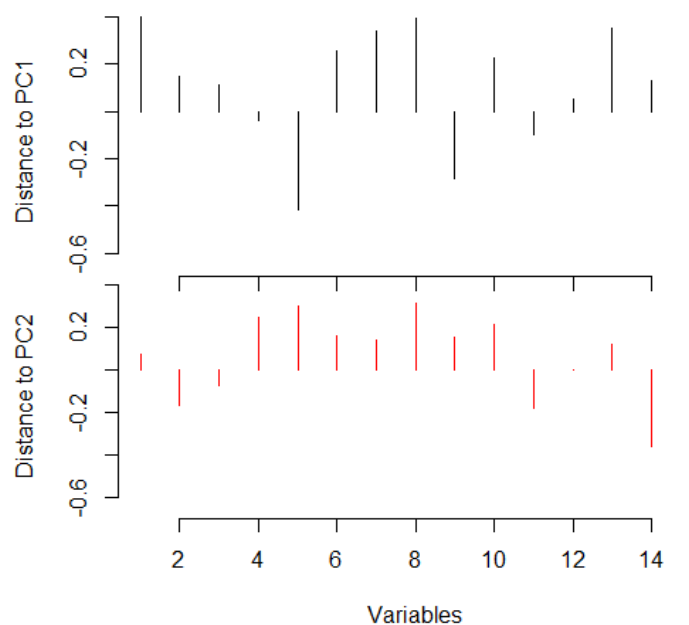
**Figura 10.** Biplot para los factores del diseño experimental en el cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca. Superior. Factor Tratamiento. Inferior. Factor Bloque.

En el biplot superior no se muestra una clara separación entre los componentes debida al efecto de los tratamientos sobre las variables contempladas. Por su parte, en la figura inferior se exhibe una tendencia de agrupamiento que sugiere que se presentaron diferencias significativas entre los grupos debido a los bloques. Una inspección visual de la Figura 10 sugiere un efecto mucho más claro de los bloques sobre las variables de respuesta; no obstante, Zwanenburg *et al.* (2011), sugiere que este tipo de gráficos puede



no ser veraz al mostrar agrupaciones inexistentes entre las variables de estudio (falsos positivos) o al ocultar efectos verdaderos (falsos negativos). Vis *et al.* (2007) describe el test de permutación que permite obtener objetivamente la significancia del efecto de los factores involucrados. En este caso el análisis cuantitativo por permutación mostró un efecto estadísticamente significativo de los bloques ( $p < 0,05$ ) y un efecto nulo de los tratamientos ( $p > 0,05$ ) sobre las variables y su agrupación en los componentes principales.

La Figura 11 relaciona de las variables químicas de suelo incluidas en el análisis ASCA y los componentes extraídos con base en la agrupación por el factor experimental bloque.



**Figura 11.** Relación entre las propiedades químicas de suelo incluidas en el ASCA y los dos primeros componentes extraídos a partir del factor experimental bloque en el cultivo de mora (*R. glaucus* Benth), en Sylvania, Cundinamarca.

Las variables químicas de suelo relacionadas con el primer componente fueron CE, P, S, K, Fe, y las relaciones Ca+Mg/K y Mg/K. Para el caso del segundo componente extraído, las variables relacionadas fueron pH, Al, Ca, Mg, Na, CICE, B y la relación Ca/Mg. En primer lugar se evidencia la diferencia en la correlación de variables y componentes entre el análisis de componentes principales estándar o convencional presentado en el análisis preliminar de los datos y el análisis de componentes principales realizado sobre las variables cuando se considera el efecto del factor bloque sobre las variables de estudio. Lo anterior señala que las características de suelo de cada bloque incidieron

significativamente en la agrupación de las propiedades químicas incluidas en el análisis no espacial de la información.

Las relaciones establecidas en el segundo componente pueden ser analizadas a partir del pH del suelo en los bloques, que condicionan la disponibilidad de nutrientes, el balance entre los mismos y la disponibilidad del Al. Así mismo el tipo de minerales y la cantidad de materia orgánica presentes en el suelo condicionan la capacidad de intercambio catiónico del mismo, de modo que el bloque 3, con predominio de integrados 2:1 y 2:1:1 tiende a presentar mayor capacidad de intercambio de cationes en comparación con los bloques 1 y 2.

Sintetizando, se encontró que las distintas dosis de fertilizante aplicadas a las plantas de mora no ejercieron efecto alguno sobre las propiedades químicas evaluadas mediante ajustes espaciales (contenido de materia orgánica, acidez intercambiable y contenido de micronutrientes Zn, Cu y Mn en suelo) ni tampoco sobre las propiedades evaluadas mediante técnicas multivariantes no espaciales (pH, CE, contenidos de P, S, Ca, K, Mg, Na, Fe, CICE y relaciones catiónicas). Probablemente el efecto de la fertilización pudo no ser evidente al corto plazo, al respecto diversas investigaciones señalan que los efectos de las prácticas de manejo sobre las propiedades químicas de los suelos se evalúan con mayor certeza en experimentos de larga duración (Mitchell *et al.* 1991; Nel *et al.* 1996; Belay, 2002). Jacobs y Timmer (2005), señalan que la fertilización puede tener efectos profundos a largo plazo, sobre propiedades químicas del suelo, como la conductividad eléctrica, pH y la disponibilidad de nutrimentos.

Los valores promedio por tratamiento de las propiedades químicas de suelo se exponen en el

Anexo L. El pH mostró su valor máximo (6,17) y mínimo (4,65) con la aplicación de los tratamientos 8 (64 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 16 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 de K<sub>2</sub>O y 40 de CaO) y 15 (22 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 16 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 de K<sub>2</sub>O y 80 de CaO), respectivamente. El comportamiento del pH con relación a los nutrientes aplicados señala que principalmente la cantidad de nitrógeno y calcio fueron las de mayor influencia. Lo anterior se sustenta por un lado en el tipo de fuente de N usada para la fertilización, particularmente los fertilizantes basados en amonio (urea, DAP y MAP) puede disminuir el pH en suelos que tienden a la alcalinidad (McCauley *et al.*, 2017). Por otro lado, la toma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por parte de la planta promueve una concentración alta de aniones sobre cationes al interior de la raíz y una posterior liberación de iones OH<sup>-</sup> al medio, lo cual alcaliniza el suelo, contrario a lo que sucede luego de la toma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, la cual conlleva a una liberación de iones H<sup>+</sup> desde la raíz y por supuesto la acidificación del medio (Neumann y Romheld, 2001).

La conductividad eléctrica presentó su valor mínimo (0,4 dS.m<sup>-1</sup>) y máximo (1,25 dS.m<sup>-1</sup>) con la aplicación de los tratamientos 10 (64 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 4 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 80 de K<sub>2</sub>O y 80 de CaO) y 24 (43 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 10 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 100 de K<sub>2</sub>O y 88,3 de CaO), respectivamente. Jacobs y Timmer (2005), sugieren que los fertilizantes de síntesis química tienden a alterar la conductividad eléctrica de la solución del suelo. La conductividad eléctrica en un indicador adecuado de la salinidad del suelo, y tiende a aumentar rápidamente con altas concentraciones de amonio como resultado de la aplicación de fertilizantes basados en este compuesto, como por ejemplo el DAP y el MAP (Bryla *et al.* 2010). La cantidad de nitrógeno aportado en el tratamiento que rindió mayor valor de CE (1,25 dS.m<sup>-1</sup>) fue menor en comparación al tratamiento que mostró 0,4 dS.m<sup>-1</sup>, es decir que el aumento de la adición de N al suelo no fue la causa de una mayor CE, lo cual difiere de lo afirmado por Han *et al.*, (2014), quienes aseveran que el aumento en la tasa de nitrificación como resultado de una aplicación mayor de fertilizantes nitrogenados conduce a una liberación de protones y a su vez la acidificación del medio puede inducir a la liberación de cationes a la solución del suelo, acelerando la salinización del mismo.

Los valores para contenido de materia orgánica oscilaron entre 8,3 y 25,16%, que fueron resultado de la aplicación de los tratamientos 6 (64 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 4 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 de K<sub>2</sub>O y 40 de CaO) y 16 (64 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 16 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 de K<sub>2</sub>O y 80 de CaO), respectivamente. Este comportamiento sugiere un efecto más marcado de la aplicación de P y Ca sobre el contenido de materia orgánica en el suelo, lo cual puede sustentarse en que la aplicación de P en suelos ácidos resulta en la precipitación del Al como fosfatos del Al insolubles, que

actúan como agentes cementantes de los coloides del suelo, al igual que el calcio y los compuestos de hidróxido y Al, y que finalmente contribuyen a la estabilización de la materia orgánica y consecuentemente a la mejora de algunas propiedades físicas del suelo como la estabilidad de agregados (Haynes y Naidu, 1998). Como respuesta de la cantidad aplicada de P, también cabe discutir la dinámica de la concentración de P en el suelo, tomando en cuenta la presencia de cenizas volcánicas en el lote de cultivo. La mayor concentración se presentó en las zonas que recibieron la aplicación de 43 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 18,5 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 100 de K<sub>2</sub> y 60 de CaO (tratamiento 20), y el menor contenido en suelo se dio como resultado de la aplicación de 22 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 4 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 de K<sub>2</sub> y 20 de CaO (tratamiento 5). Se observa que mayor aplicación de P incidió en mayores contenidos del elemento en el suelo como los afirman Velásquez *et al.* (2016), quienes sustentan que la aplicación de fertilizantes fosfatados al suelo aumenta el contenido de P en todas sus fracciones, principalmente en suelos con cenizas volcánicas.

La CICE fluctuó entre 6,09 y 22,81 cmol<sub>(+)</sub>.kg<sup>-1</sup>, valores relacionados con los tratamientos 17 (13,3 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 10 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 100 de K<sub>2</sub> y 60 de CaO) y 20 (43 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 18,3 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 100 de K<sub>2</sub> y 60 de CaO), respectivamente. Mayor aplicación de N posibilitó el aumento en la CICE, al respecto Radulov *et al.* (2011) afirmaron que los fertilizantes basados en amonio elevan la CIC, lo que puede explicarse por la retención de iones NH<sub>4</sub><sup>+</sup> aplicados. En el caso del uso de fertilizantes a base de fosfato y amonio, el aumento de la CIC puede ser explicado por la retención de iones H<sup>+</sup> por el complejo de cambio del suelo como resultado del proceso de oxidación del amonio.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Se evaluaron aspectos tales como el pH del suelo, la distribución de poros por tamaño la densidad aparente, la mineralogía de arcillas y arenas y la identificación óptica de arenas en el suelo del lote experimental, para soportar los resultados encontrados con respecto a las relaciones establecidas entre las variables estudiadas y con relación a los efectos de los tratamientos sobre la productividad del cultivo, en el municipio de Sylvania, Cundinamarca.

El ACP estándar permite establecer similitudes globales entre las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo, por otro lado, con el ACP-PG se logra establecer relaciones entre variables a escala local, que para este caso fueron condicionadas por la densidad aparente del suelo, la distribución de poros por tamaño y el contenido de material no cristalino en la fracción arcillosa del suelo de cada bloque experimental.

El análisis inferencial realizado permitió que se expresara el efecto de las distintas dosis de N, P, K y Ca sobre la productividad del cultivo, removiendo la correlación espacial entre las unidades experimentales. Derivado de ello se encontró que la estrategia de fertilización más adecuada para el cultivo de mora en etapa productiva en suelos de la zona de estudio, debe considerar aspectos como la mineralogía de arcillas del suelo (específicamente, el contenido de minerales amorfos y de arcillas 2:1 y 2:1:1) y el pH, para ajustar las cantidades de N, P, K y Ca que requiere el cultivo y obtener mayor producción de frutos por planta, debido a aspectos como la fijación de fósforo, inhibición de la mineralización de la materia orgánica o pérdidas de elementos por lixiviación, propias en este tipo de suelos.

En suelos con pH 5.2 y altas cantidades de minerales amorfos y arcillas 2:1 y 2:1:1 en el horizonte superficial, las cantidades de nutrientes que favorecieron en mayor medida la producción del cultivo fueron 64,0 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 16,0 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 80,0 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O y 40,0 kg.ha<sup>-1</sup> CaO, lo cual contrasta con lo reportado por Vayas (2001) quien sugiere dosis

de 82,5 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 15 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 66 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O para la etapa productiva del cultivo. Se obtuvo que fue necesario una aplicación alta de P para suministrar a la planta la cantidad adecuada del elemento, tomando en cuenta que gran parte de lo aplicado es retenido y fijado por minerales amorfos presentes en suelos con contenidos de cenizas volcánicas, aunque esto puede ser contrarrestado con la aplicación del fertilizante en banda e incorporado, se debe propender por la mezcla de fuentes orgánicas o inorgánicas para lograr un adecuado nivel de productividad, sin incrementar los costos de producción por aplicación excesiva de P inorgánico. También se pudo notar que se aplicó gran cantidad de K para lograr alta productividad, dadas las condiciones de fijación de este elemento en el suelo.

Se lograron establecer las condiciones edáficas, principalmente relacionadas con la presencia de minerales amorfos y de arcillas 2:1 y 2:1:1, así como el pH, bajo las cuales se expresó el mayor potencial productivo del cultivo de mora bajo estudio. La inclusión del análisis de propiedades mineralógicas de suelo puede permitir aplicar adecuadamente insumos, en el sitio y en las cantidades precisas, lo cual es fundamental en el manejo de sistemas de producción agrícola.

## 7. Anexos

**Anexo A.** Dosis de N, P, K y Ca de cada tratamiento aplicado en el cultivo experimental de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Tratamiento	Dosis (kg.ha <sup>-1</sup> )			
	N	P	K	Ca
1	22	4	80	40
2	64	4	80	40
3	22	16	80	40
4	64	16	80	40
5	22	4	120	40
6	64	4	120	40

7	22	16	120	40
8	64	16	120	40
9	22	4	80	80
10	64	4	80	80
11	22	16	80	80
12	64	16	80	80
13	22	4	120	80
14	64	4	120	80
15	22	16	120	80
16	64	16	120	80
17	13.3	10	100	60
18	72.7	10	100	60
19	43	1.5	100	60
20	43	18.5	100	60
21	43	10	71.7	60
22	43	10	128.3	60
23	43	10	100	31.7
24	43	10	100	88.3
25	43	10	100	60

**Anexo B.** Descripción general del perfil BL2, ubicado en el bloque 2 del cultivo experimental de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

<b>Fecha descripción:</b> 25-01-2016			
<b>Símbolo unidad cartográfica:</b> MLKd			
<b>Localización geográfica:</b>		<b>Departamento:</b> Cundinamarca	<b>Municipio:</b> Sylvania
<b>Sitio:</b> Vereda Aguabonita			
<b>Coordenadas geográficas:</b>		<b>Latitud:</b> 4.4236631	<b>Longitud:</b> -74.3364254
<b>Paisaje:</b> Montaña		<b>Tipo de relieve:</b> Glacís coluvial	
<b>Relieve:</b> Moderadamente quebrado			
<b>Material parental:</b> Mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos gravigénicos			
<b>Clima ambiental:</b> Frío húmedo			
<b>Precipitación promedio anual:</b> 1400 mm			
<b>Temperatura promedio anual:</b> 20°C			
<b>Clima edáfico:</b> Isomésico, údico			
<b>Clase y grado de erosión:</b> Hídrica laminar, ligera			
<b>Drenajes:</b>		<b>Interno:</b> Medio	<b>Externo:</b> Medio a rápido
			<b>Natural:</b> Bien drenado
<b>Profundidad efectiva:</b> Profunda			



**Uso actual:** Cultivo de mora.



0-27 cm

27- 62 cm

62- 104 cm

La descripción morfológica del perfil BL2 se expone a continuación:

0-27 cm: Color en húmedo pardo a pardo oscuro (10YR4/3); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares; consistencia en húmedo firme, plástica; regulares poros finos, abundante presencia de raíces; ligera reacción al NaF; límite difuso; no presenta pedregosidad; pH: 5,7.

27-62 cm: Color en húmedo (10YR3/3); textura franca; estructura en bloques subangulares; consistencia en húmedo firme, plástica; regulares poros finos, presencia de raíces medias; fuerte reacción al NaF; límite claro; no presenta pedregosidad; pH: 5.6.

62-104 cm: Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/4); textura franca; estructura en bloques subangulares; consistencia en húmedo friable plástica; regulares poros finos, presencia de raíces finas; fuerte reacción al NaF; límite claro; no presenta pedregosidad; pH: 5.2.

**Anexo C.** Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL1 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Silvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	Mineral	Fracción liviana (%)	Fracción densa (%)	Porcentaje de la fracción liviana	Porcentaje de la fracción densa
		Qz	88			
		Fp	8			
		Ft	-			
		Fr. L	2			
		Vv	2			
		Ct		Tr		
		C		Tr		
		D		-		
		Gal		1		
		Hm		-		
		Hs		27		
		Hr		47		
		L		4		
		Ma		21		
		T		-		
		Z		-		
		Qz	93			
		Fp	6			
		Ft	-			
		Fr. L	-			
		Vv	1			
		Ct		-		
		C		2		
		D		-		
		Gal		-		
		Hm		Tr		
		Hs		28		
		Hr		46		
		L		Tr		

	<b>Ma</b>		24		
	<b>T</b>		-		
	<b>Z</b>		-		
	<b>Qz</b>	89			
	<b>Fp</b>	9			
	<b>Ft</b>	-			
	<b>Fr. L</b>	1			
	<b>Vv</b>	1			
	<b>Ct</b>		-		
	<b>C</b>		Tr		
	<b>D</b>		-		
	<b>Gal</b>		2		
	<b>Hm</b>		-		
	<b>Hs</b>		3		
	<b>Hr</b>		68		
	<b>L</b>		3		
	<b>Ma</b>		24		
	<b>T</b>		-		
	<b>Z</b>		Tr		

Qz: Cuarzo. Fp: Feldepatos. Ft: Fitolitos. Fg. L: Fragmentos líticos. Vv: Vídrio Volcánico. Ct: Calcita. C: Circón. D: Diopsido. Gal: Granos Alterados. Hm.: Hematita. Hs: Hiperstena. Hr.: Hornblenda. L: Lamprobolita. Ma: Magnetita. T: Turmalina. Z: Zoisita.

**Anexo D.** Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL2 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Sylvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	Mineral	Fracción liviana (%)	Fracción densa (%)	Porcentaje de la fracción liviana	Porcentaje de la fracción densa
		<b>Qz</b>	90			
		<b>Fp</b>	6			
		<b>Ft</b>	1			
		<b>Fr. L</b>	1			
		<b>Vv</b>	2			
		<b>Ct</b>		-		
		<b>C</b>			1	

	D		1		
	Gal		1		
	Hm		1		
	Hs		26		
	Hr		54		
	L	Tr			
	Ma		14		
	T	-			
	Z		2		
	Qz	93			
	Fp	7			
	Ft	-			
	Fr. L	-			
	Vv	Tr			
	Ct	-			
	C		4		
	D	-			
	Gal		3		
	Hm		1		
	Hs		15		
	Hr		40		
	L		3		
	Ma		34		
	T	-			
	Z	-			

Qz: Cuarzo. Fp: Feldepatos. Ft: Fitolitos. Fg. L: Fragmentos líticos. Vv: Vidrio Volcánico. Ct: Calcita. C: Circón. D: Diopsido. Gal: Granos Alterados. Hm.: Hematita. Hs: Hiperstena. Hr.: Hornblenda. L: Lamprobolita. Ma: Magnetita. T: Turmalina. Z: Zoisita.

**Anexo E.** Mineralogía de la fracción densa y liviana de arenas del perfil BL3 del lote de cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Silvania, Cundinamarca.

Perfil	Prof. (cm)	Mineral	Fración liviana (%)	Fración densa (%)	Porcentaje de la fracción liviana	Porcentaje de la fracción densa
		Qz	85			
		Fp	13			
		Ft	-			

	Fr. L	2		
	Vv	Tr		
	Ct	-		
	C	Tr		
	D	-		
	Gal	1		
	Hm	-		
	Hs	24		
	Hr	49		
	L	1		
	Ma	25		
	T	-		
	Z	-		
	Qz	81		
	Fp	11		
	Ft	-		
	Fr. L	8		
	Vv	-		
	Ct	-		
	C	Tr		
	D	-		
	Gal	1		
	Hm	1		
	Hs	3		
	Hr	72		
	L	1		
	Ma	22		
	T	Tr		
	Z	-		
	Qz	83		
	Fp	17		
	Ft	-		
	Fr. L	Tr		
	Vv	-		
	Ct	-		
	C	Tr		

	<b>D</b>	-
	<b>Gal</b>	3
	<b>Hm</b>	-
	<b>Hs</b>	3
	<b>Hr</b>	81
	<b>L</b>	1
	<b>Ma</b>	12
	<b>T</b>	-
	<b>Z</b>	-

Qz: Cuarzo. Fp: Feldepatos. Ft: Fitolitos. Fg. L: Fragmentos líticos. Vv: Vídrio Volcánico. Ct: Calcita. C: Circón. D: Diopsido. Gal: Granos Alterados. Hm.: Hematita. Hs: Hiperstena. Hr.: Hornblenda. L: Lamprobolita. Ma: Magnetita. T: Turmalina. Z: Zoisita.

**Anexo F.** Estadística descriptiva de propiedades químicas del suelo y productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en el municipio de Sylvania, Cundinamarca.

	<b>Máx</b>	<b>Mín</b>	<b>Prom</b>	<b>Med</b>	<b>Var</b>	<b>DesvEst</b>	<b>CV</b>	<b>Curt</b>	<b>Sesgo</b>
<b>PROD</b>	4647,2	28	1198,9	882	863.634,4	929,32	77,51	5,48	1,58
<b>pH</b>	6,98	3,82	5,49	5,43	0,50	0,71	12,8	2,42	0,09
<b>CE</b>	2,83	0,25	0,73	0,58	0,24	0,49	67,6	8,02	2,17
<b>MO</b>	40,43	5,08	14,43	13,87	34,90	5,91	40,9	6,71	1,32
<b>P</b>	347,26	6,41	43,31	30,00	2.585,69	50,85	117,4	20,84	3,83
<b>S</b>	96,32	3,68	17,28	11,95	288,79	16,99	98,3	14,10	3,20
<b>Acl</b>	9,80	0,00	1,30	0,84	2,92	1,71	131,5	9,73	2,05
<b>Al</b>	7,95	0,00	1,14	0,64	2,19	1,48	129,5	7,70	1,78
<b>Ca</b>	44,48	0,23	9,78	4,81	110,81	10,53	107,7	4,76	1,51
<b>Mg</b>	9,45	0,16	0,97	0,77	1,30	1,14	116,9	43,38	5,76
<b>K</b>	2,93	0,11	0,68	0,49	0,31	0,56	81,3	6,28	1,67
<b>Na</b>	0,40	0,00	0,11	0,08	0,01	0,08	75,3	5,40	1,37
<b>CICE</b>	47,33	2,54	12,72	7,96	109,78	10,48	82,4	4,97	1,57
<b>Fe</b>	5.310,99	59,08	383,50	258,01	434.503,90	659,17	171,9	45,36	6,26
<b>Mn</b>	12,70	0,00	3,49	2,91	5,84	2,42	69,3	5,86	1,52
<b>Zn</b>	27,50	0,00	6,45	5,10	24,52	4,95	76,8	6,30	1,45
<b>Cu</b>	13,56	0,00	3,11	2,21	6,26	2,50	80,5	8,74	2,37
<b>B</b>	0,72	0,02	0,39	0,40	0,02	0,15	36,8	2,61	-0,05
<b>Ca/Mg</b>	28,40	1,20	9,38	7,50	39,80	6,31	67,3	3,98	1,14
<b>Ca+Mg/K</b>	146,50	0,40	18,21	11,10	474,45	21,78	119,6	18,91	3,51
<b>Mg/K</b>	6,10	0,20	1,65	1,20	1,54	1,24	75,4	5,79	1,81

<b>Ca/B</b>	96.033,00	92,00	6.942,66	3.280,00	159.482.343,00	12.628,63	181,9	35,55	5,18
-------------	-----------	-------	----------	----------	----------------	-----------	-------	-------	------

Máx: valor máximo. Mín: valor mínimo. Prom: promedio aritmético. Med: mediana. Var: varianza. DesvEst: desviación estándar. CV: coeficiente de variación de la media (%). Curt: curtosis. Asim: asimetría.

**Anexo G.** Medidas de significancia y de ajuste de modelos de regresión local de tendencia de superficie para cada variable procesada.

Variable	p-valor	R <sup>2</sup> ajustado
Productividad del cultivo	<0.001	0,45
Contenido de materia orgánica	<0.001	0,11
Acidez intercambiable	<0.001	0,18
Contenido de Mn	<0.001	0,30
Contenido de Zn	<0.001	0,20
Contenido de Cu	<0.001	0,43

**Anexo H.** Resultados de análisis de varianza con las variables originales y con los residuales de los modelos de tendencia de superficie.

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Datos originales			Residuales de tendencia		
			F	p-valor		F	p-valor	
	Tratamientos	24	2,1	0,0143	*	2,369	0,00547	**
	Bloques	2	31,87	1,56E-09	***	1,252	0,00506	*
	Tratamientos	24	1,274	0,233		1,145	0,336	
	Bloques	2	0,239	0,788		0,451	0,640	
	Tratamientos	24	1,26	0,2433		1,155	0,328	
	Bloques	2	4,806	0,0125		0,051	0,950	
	Tratamientos	24	0,706	0,821		1,082	0,397	
	Bloques	2	17,752	1,69E-06	***	0,866	0,427	
	Tratamientos	24	0,889	0,6137		0,917	0,580	
	Bloques	2	3,661	0,0331		0,438	0,648	
	Tratamientos	24	1,095	0,384		0,865	0,642	
	Bloques	2	25,558	2,77E-08	***	0,989	0,379	

0 \*\*\*\* 0.001 \*\*\* 0.01 \*\* 0.05 \* 0.1 . 1

**Anexo I.** Resultados de análisis de varianza multivariante y univariante para las propiedades químicas del suelo y la productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.).

MANOVA	Df	Pillai	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
--------	----	--------	----------	--------	--------	--------

TRAT	24	6.8413	0.96638	504	1008	0.6677457	
BLOQUE	2	1.3402	2.805	42	58	0.0001489	***
Residuals	48						
---							
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1							

<b>Productividad</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	19866217	827759	2.1	0.0143	*
BLOQUE	2	25121988	12560994	31.87	1.56E-09	***
Residuals	48	18920741	394182			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>pH</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	11.471	0.4779	1.078	0.4012	
BLOQUE	2	3.175	1.5874	3.579	0.0356	*
Residuals	48	21.289	0.4435			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>CE</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	2.302	0.0959	0.733	0.793	
BLOQUE	2	0.393	0.1965	1.502	0.233	
Residuals	48	6.278	0.1308			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>MO</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	1023	42.62	1.274	0.233	
BLOQUE	2	16	7.99	0.239	0.788	
Residuals	48	1606	33.45			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>P</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.0747	0.003112	0.902	0.599	
BLOQUE	2	0.01343	0.006717	1.946	0.154	



Residuals	48	0.1657	0.003452			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>S</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.05878	0.002449	0.904	0.596	
BLOQUE	2	0.00627	0.003137	1.157	0.323	
Residuals	48	0.13008	0.00271			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>Acl</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	73.26	3.052	1.26	0.2433	
BLOQUE	2	23.29	11.645	4.806	0.0125	*
Residuals	48	116.3	2.423			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>Ca</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	30.32	1.263	0.835	0.67827	
BLOQUE	2	20.74	10.372	6.852	0.00241	**
Residuals	48	72.66	1.514			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>Mg</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.12183	0.00508	0.859	0.64956	
BLOQUE	2	0.07319	0.0366	6.192	0.00405	**
Residuals	48	0.28372	0.00591			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

<b>K</b>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	7.287	0.3036	1.116	0.3638	
BLOQUE	2	2.315	1.1573	4.253	0.0199	*

Residuals	48	13.063	0.2721			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Na	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.15201	0.006334	0.98	0.507	
BLOQUE	2	0.02406	0.012028	1.862	0.166	
Residuals	48	0.31014	0.006461			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

CICE	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.05007	0.002086	0.493	0.9683	
BLOQUE	2	0.02419	0.012094	2.858	0.0672	.
Residuals	48	0.20312	0.004232			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Fe	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.02529	0.001054	0.539	0.9481	
BLOQUE	2	0.01506	0.007528	3.852	0.0281	*
Residuals	48	0.09381	0.001954			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Mn	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	74.93	3.12	0.706	0.821	
BLOQUE	2	157.02	78.51	17.752	1.69E-06	***
Residuals	48	212.28	4.42			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Cu	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	94.56	3.94	1.095	0.384	
BLOQUE	2	183.89	91.94	25.558	2.77E-08	***
Residuals	48	172.68	3.6			
---						

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		
---	--	--

Zn	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	513.8	21.41	0.889	0.6137	
BLOQUE	2	176.4	88.18	3.661	0.0331	*
Residuals	48	1156	24.08			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	0.3341	0.01392	0.551	0.942	
BLOQUE	2	0.0025	0.001241	0.049	0.952	
Residuals	48	1.2136	0.025283			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Ca/Mg	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	8.717	0.3632	0.741	0.7839	
BLOQUE	2	5.525	2.7624	5.639	0.00631	**
Residuals	48	23.513	0.4899			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Ca+Mg/K	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	20.53	0.855	0.962	0.5277	
BLOQUE	2	7.53	3.763	4.231	0.0203	*
Residuals	48	42.69	0.889			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Mg/K	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	9.593	0.3997	1.012	0.471	
BLOQUE	2	2.373	1.1865	3.005	0.059	.
Residuals	48	18.955	0.3949			
---						

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		
---	--	--

Ca/B	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
TRAT	24	38.56	1.607	0.832	0.681	
BLOQUE	2	19.43	9.714	5.033	0.0104	*
Residuals	48	92.65	1.93			
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

**Anexo J.** Comparación de medias por Tukey de los diferentes análisis de varianza realizados sobre los datos de productividad del cultivo de mora (*R. glaucus* Benth.) en Silvania, Cundinamarca.

Datos originales			Residuales de tendencia		
Tratamientos	Promedio	Grupos	Tratamientos	Promedio	Grupos
T21	2373	a	T21	1074	a
T4	2149	ab	T12	882,8	ab
T12	1931	ab	T4	954,9	ab
T25	1888	ab	T24	430,4	ab
T24	1871	ab	T25	668,6	ab
T20	1708	ab	T18	236,6	ab
T18	1391	ab	T20	402	ab
T10	1339	ab	T10	69,02	ab
T16	1266	ab	T11	-27,08	ab
T11	1215	ab	T16	62,97	ab
T2	1196	ab	T2	-117,5	ab
T23	1195	ab	T6	-176,7	ab
T8	1061	ab	T23	-223,7	ab
T19	1001	ab	T17	-575,3	ab
T17	958	ab	T8	-216,1	ab
T22	945	ab	T13	-273,7	ab
T3	934,7	ab	T1	-401,9	ab
T1	889	ab	T15	-262,2	ab
T6	838,3	ab	T22	-154,6	ab
T14	820,3	ab	T3	-7,638	ab
T5	788	ab	T5	-501,5	ab

T15	725	ab	T9	-262,2	ab
T13	698,7	ab	T19	-258,9	ab
T9	454,7	ab	T7	-569,2	ab
T7	338	b	T14	-753,1	b

Tratamientos con la misma letra no presentaron diferencia estadísticamente significativa al 5 %.

**Anexo K.** Productividad promedio de mora (g/planta) por tratamiento y bloque del cultivo experimental en Silvanía, Cundinamarca.

Tratamientos	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3
T1	1476	662	529
T2	1150	1396	1042
T3	1332	542	930
T4	4647,2	1212	588
T5	1536	684	144
T6	1243	882	390
T7	792	194	28
T8	1818	1159,6	204
T9	594	320	450
T10	1712	1810	494
T11	2188	872	584
T12	2572	2322	900
T13	879	823	394
T14	734	1047	680
T15	1029,2	641,8	504
T16	3176	330	292
T17	1750	720	404
T18	2287,8	1070	814
T19	1702	826	476
T20	2316	2124	685
T21	4034	2720	364
T22	1430	862	543
T23	1763,6	972	850
T24	3440	949,6	1222
T25	3414	1794	456



**Anexo L.** Valores promedio por tratamiento de las propiedades químicas de suelo del cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth.).

TRAT	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MO	pH	CE	CICE	P	S	K	Ca	Mg	Na	Al	AcI	Cu	Zn	Mn	B	Fe	Ca/Mg	Ca+Mg/K	Mg/K	Ca/B
1	22	4	80	40	21,81	5,56	0,66	17,33	27,66	19,11	0,59	14,23	0,88	0,08	1,40	1,53	2,41	5,48	3,14	0,34	265,98	10,47	16,93	1,50	8851,67
2	64	4	80	40	13,01	5,25	1,23	11,65	24,21	16,03	0,57	8,86	0,64	0,11	1,35	1,46	3,01	4,71	2,52	0,43	370,36	10,50	15,00	1,47	4055,00
3	22	16	80	40	19,99	5,23	0,66	11,09	17,82	10,07	0,82	7,94	0,83	0,07	1,29	1,43	5,03	9,43	5,46	0,42	366,24	7,10	9,17	1,23	4472,33
4	64	16	80	40	13,65	5,73	0,46	13,92	97,90	9,96	0,45	10,86	0,72	0,05	1,67	1,84	2,49	5,47	3,18	0,51	292,96	12,43	25,50	1,87	4785,00
5	22	4	120	40	13,42	5,84	0,53	13,21	15,54	12,72	0,66	10,62	1,29	0,12	0,44	0,52	1,99	4,07	2,53	0,39	203,14	7,50	16,80	2,13	5831,67
6	64	4	120	40	8,30	5,06	0,94	9,75	19,92	17,96	0,79	6,36	0,57	0,15	1,69	1,87	2,54	3,61	2,01	0,46	238,01	6,47	8,50	1,03	3142,67
7	22	16	120	40	13,28	6,11	0,48	17,43	49,50	7,81	0,69	15,01	1,57	0,16	0,00	0,00	1,99	4,85	2,58	0,35	356,21	10,27	24,23	2,23	9653,00
8	64	16	120	40	13,96	4,65	0,87	6,78	41,86	18,68	0,63	3,27	0,41	0,10	1,93	2,38	2,07	5,38	5,11	0,40	904,21	5,77	4,57	0,67	1345,67
9	22	4	80	80	14,75	5,47	0,92	9,39	25,16	59,32	0,90	5,95	1,04	0,12	1,15	1,38	5,69	11,25	4,93	0,31	242,68	5,50	7,23	1,10	3657,67
10	64	4	80	80	14,37	5,47	0,40	9,35	42,83	9,85	0,24	6,59	0,68	0,08	1,57	1,75	4,93	4,11	2,59	0,39	309,14	6,97	31,00	2,90	4970,67
11	22	16	80	80	14,50	5,85	0,85	22,04	32,05	37,76	0,70	19,64	1,16	0,21	0,27	0,32	2,36	8,60	5,10	0,32	205,56	13,93	34,03	1,80	12994,00
12	64	16	80	80	13,36	5,33	0,41	7,03	50,97	13,33	0,25	4,92	0,55	0,06	1,03	1,25	2,70	8,50	3,49	0,35	322,30	8,80	25,97	2,53	3746,67
13	22	4	120	80	10,46	5,85	0,94	13,53	41,50	16,52	1,34	11,10	0,86	0,08	0,09	0,15	2,69	7,39	3,22	0,49	193,98	10,33	8,30	0,77	4521,00
14	64	4	120	80	9,04	5,83	0,85	16,14	41,46	11,72	1,22	13,47	0,95	0,08	0,32	0,41	3,18	4,73	3,09	0,41	248,24	13,17	9,73	0,80	5774,00
15	22	16	120	80	13,70	6,17	0,88	17,25	38,05	10,34	1,32	14,73	1,03	0,18	0,00	0,00	2,01	12,73	2,09	0,26	166,12	11,57	10,80	1,00	15607,00
16	64	16	120	80	25,16	4,95	0,66	8,82	46,16	12,11	0,41	4,37	0,69	0,11	2,92	3,25	2,29	9,90	4,62	0,37	562,49	4,93	12,80	1,73	2153,33
17	13,3	10	100	60	12,94	5,02	0,41	6,09	32,47	9,19	0,50	2,35	3,40	0,07	2,47	2,77	3,95	5,51	2,90	0,44	291,65	5,70	7,23	0,97	1011,00
18	72,7	10	100	60	12,30	5,43	0,47	6,80	44,80	19,50	0,28	5,02	0,63	0,10	0,73	0,77	5,50	4,60	3,23	0,35	283,24	8,07	21,40	2,43	2789,00
19	43	1,5	100	60	17,00	5,38	0,77	10,42	20,28	9,41	0,60	7,74	0,82	0,07	1,00	1,19	2,14	4,59	2,80	0,51	365,37	7,13	12,63	1,50	3479,67
20	43	18,5	100	60	14,24	6,01	0,71	22,81	154,83	17,13	1,02	19,89	1,31	0,15	0,42	0,44	3,81	9,77	3,70	0,33	185,31	12,80	17,40	1,27	10486,33
21	43	10	71,7	60	10,23	5,43	0,47	14,53	40,74	11,40	0,21	11,48	0,52	0,12	2,09	2,19	2,21	5,54	2,35	0,46	288,48	13,77	55,60	2,53	5642,00
22	43	10	128,3	60	11,87	5,56	0,76	10,36	71,91	21,43	0,84	8,09	0,76	0,06	0,50	0,60	3,33	4,63	3,31	0,45	272,65	11,03	17,90	1,70	4149,67
23	43	10	100	31,7	15,81	4,91	0,51	7,77	21,38	9,52	0,37	3,26	0,57	0,03	2,86	3,55	3,78	5,11	2,86	0,48	1911,64	6,17	11,93	1,83	1355,00
24	43	10	100	88,3	11,54	5,93	1,25	18,64	35,33	22,92	0,79	16,50	1,16	0,18	0,00	0,00	3,13	5,24	3,15	0,33	224,14	14,33	28,20	1,67	10698,67
25	43	10	100	60	16,55	5,30	0,72	8,90	25,34	22,97	0,61	6,58	0,81	0,15	0,70	0,75	2,08	1,75	4,87	0,33	383,23	6,97	15,30	2,17	34182,33

Celdas sombreadas corresponden a valores máximos y mínimos de cada propiedad química de suelo. MO: %. CE: dS.m<sup>-1</sup>. CICE: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. P: mg kg<sup>-1</sup>. S: mg kg<sup>-1</sup>. K: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. Ca: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. Mg: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. Na: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. Al: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. AcI: cmol(+)·kg<sup>-1</sup>. Cu: mg kg<sup>-1</sup>. Zn: mg kg<sup>-1</sup>. Mn: mg kg<sup>-1</sup>. B: mg kg<sup>-1</sup>. Fe: mg kg<sup>-1</sup>.

# Bibliografía

- Acton, D. F., y L. J. Gregorich. 1995. Understanding soil health. En: Acton D. F. and L. J. Gregorich (Eds.). *The Health of Our Soils: Toward Sustainable Agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research. Ottawa, ON. Canada. 5-10 pp.
- An, S. Huang, Y., Zheng, F. y Yang, J. 2008. Aggregate characteristics during natural revegetation on the loess plateau. *Pedosphere* 18 (6), 809- 816.
- Ann, Y. 2012. Impact of different fertilization methods on the soil, yield and growth performance of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Malaysian Journal of Soil Science* 16, 71- 87.
- Aref, S. y Wander, M.M. 1998. Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the Morrow Plots. *Adv Agro* 62,153–161.
- Arrouays, D., Martin, S., Lepretre, A. y Bourennane, H. 2000. Short, range spatial variability of metal contents in soil on a one hectare agricultural plot. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 31(3-4), 387- 400.
- Arrouays, D., Saby, N. P. A., Thioulouse, J., Jolivet, C., Boulonne, L. y Ratié, C. 2011. Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma* 161, 107- 114.
- Arshad, M. A. y Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7, 25-31.
- Arslan, O. 2013. Spatially Weighted Principal Component Analysis (PCA) Method for Water Quality Analysis. *Water Resources* 40(3), 315- 324.



- Artunduaga, B. 2010. Efecto de la fertilización en dos ecotipos de mora (*Rubus* sp.) y su relación con el rendimiento en Andisoles. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 67 p.
- Ayoola, O.T. 2010. Yield performance of crops and soil chemical changes under fertilizer treatments in a mixed cropping system, *African Journal of Biotechnology* 9(26), 4018- 4021.
- Balemi, T y Negisho, K. 2012. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(3), 547- 562.
- Barrero, L. 2009. Caracterización, evaluación y producción de material limpio de mora con alto valor agregado. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Regional 1. Cundinamarca. 84 p.
- Bautista, L. G. 2017. Evaluación del efecto de cuatro nutrientes en la severidad de antracnosis causada por *Colletotrichum gloeosporioides* CEPA 52 en mora (*Rubus glaucus* Benth.) bajo condiciones de invernadero Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá. 144 p.
- Belay, A., Claassens, A.S. y Wehner, F.C. 2002. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. *Biol. Fertil. Soils* 35(6), 420–427.
- Bertsch, P. M., y Thomas, G. 1985. Potassium status of temperate region soils. En: Munson, R (Ed.). *Potassium in agriculture*. SSSA. Madison, Wisconsin. 131–162.
- Bhatti, A., Mulla, D., Kolehler, F. y Gurmani, A. 1991. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. *Journal of the American Society of Soil Science* 55, 1523-1528.
- Bivand, R., Keitt, T. y Rowlingson, B. 2016. rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. R package version 1.2-5. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- Bongiovanni, R. 2004. La agricultura de precisión en la cosecha. *IDIA XXI Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario* 6, 85-90

- Bratchell, N. 1989. Multivariate response surface modeling by principal component analysis. *J. Chemometr.* 3, 579- 588.
- Bryla, D., Shireman, A. y Machado, R. 2010. Effects of Method and Level of Nitrogen fertilizer Application on Soil pH, Electrical Conductivity, and Availability of Ammonium and Nitrate in Blueberry. *Acta Hort.* 868, 95- 102.
- Cabezas, M., Galvis, J. y Ochoa, C. 2002. Eficiencia agronómica y económica de la aplicación de gallinaza y fósforo, en mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) para la zona fría de Boyacá. En memorias del Cuarto Seminario Nacional de Frutales de Clima Frío Moderado. Medellín, 189- 194 pp.
- Cakmak D., Saljnikov, E., Petrovic, V., Jaramaz, D. y Mrvic, V. 2010. Effect of long term nitrogen fertilization on main soil chemical properties in Cambisol, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solution for a changing world. Brisbane, Australia.
- Camacho, J.H. Luengas, C y Leiva, F. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agron.* 59(3), 273- 284.
- Cámara de Comercio de Bogotá [CCB]. 2015. Manual Mora. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial. Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá. 54 p.
- Cambardella, C. A., Moorman, T., Novak, J. Parkin, J., Turco, R. y Konopka, A. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Journal of the American Society of Soil Science* 58, 1501- 1511.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco y A. E. Konopka. 1996. Soil property contributions to yield variation patterns. En: Proceedings of the third international conference on precision agriculture. Minneapolis, Minnesota. June. p. 189-195.
- Cardona, W. A. 2017. Requerimientos nutricionales (nitrógeno, fósforo, potasio y calcio) en etapa vegetativa y reproductiva de un cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth.), ubicado en el municipio de Sylvania (Cundinamarca). Tesis presentada como requisito parcial para optar

- 
- al título de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá. 431 p.
- Carrillo, E., Aller, A., Cruz, S., Giampieri, F. Álvarez, J. 2015. Andean berries from Ecuador: A review on botany, agronomy, chemistry and health potential. *Journal of Berry Research* 5(2015), 49- 69.
- Cassman, K.G. y Pingali. P.L. 1995. Extrapolating trends from long- term experiments to farmers' fields: the case of irrigated rice systems in Asia. En: Barnett, V., Payne, R. y Steiner, R. (Eds.). *Agricultural sustainability, economic, environmental and statistical considerations*. Wiley, London, pp 63–84.
- Castrignanò, A., Giugliarini, L., Risaliti, R. y Martinelli, N. 2000. Study of spatial relationship among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma* 97: 39-60.
- Castro Filho, C. 1998. Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion. PhD dissertation. USA.
- Castro, H. y Gómez, M. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. En: *Ciencia del suelo. Principios básicos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 217- 298.
- Corporación Colombia Internacional [CCI]. 1999. Mora: un cultivo promisorio. *Exótica* 10 (3), 13-17.
- Corporación Colombia Internacional [CCI]. 2001. Mora de Castilla. *Exótica* 1(5), 17-21.
- Chang, W., Thissen, U., Ehlert, K., Koek, M., Jellema, R., Hankemeier, T. van der Greef, J. y Wang, M. 2006. Effects of growth conditions and processing on *Rehmannia glutinosa* usin fingerprint strategy. *Planta Med.* 72, 458- 467.
- Chen W., Mccaughey, W., Grant, C. y Bailey, L. 2001. Pasture type and fertilization effects on soil chemical properties and nutrient redistribution. *Canadian J. Soil Sci.* 81, 395 – 404.
- Clough, A. y Skjemstad, J.O. 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. *Australian Journal of Soil Research* 38, 1005-1016.

- Conti, M. E., De La Horra, A, Effron, D. y Zourarakis, D. 2001. Factors affecting potassium fixation in Argentine agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 2679- 2690.
- Córdoba, M., Balzarini, M., Bruno, C. y Costa, J. 2012. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados. Una aplicación en agricultura de precisión. *Rev. FCA UNCUYO* 44(1), 27-39.
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J. y Balzarini, M. 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Computer and Electronics in Agriculture* 97, 6- 14.
- Curtin, D. y Simillie, G.W. 1983. Soil solution composition as affected by liming and incubation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 701-707.
- DeCarlo, L. 1997. On the meaning and use of kurtosis. *Psychological Methods* 2(3), 292- 307.
- De Mendiburu, F. 2017. agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-5. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.
- Demsar, U., Harris, P., Brundson, C., Fotheringham, A. y McLoone, S. 2013. Principal Component Analysis on Spatial Data: An overview. *Annals of the Association of American Geographers* 103 (1), 106- 128.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. 2013. El cultivo de la mora de Castilla (*Rubus glucus* Benth) frutal de clima frío moderado, con propiedades curativas para la salud humana. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. *Boletín mensual* 17.
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicsek, D.C. y Stewart, B. A. 1994. Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. 244 p.
- Dorscheidt, T. 2013. MetStaT: Statistical metabolomics tools. R package version 1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=MetStaT>.

- Dray, S., Said, S. y Debias, F. 2008. Spatial ordination of vegetation data using a generalization of Wartenberg's multivariate spatial correlation. *J. Veg. Sci.* 19, 45-56.
- Dutilleul, P. 1993. Spatial heterogeneity and the design of ecological field experiments. *Ecology* 74, 1646-1658.
- Escoto, M. A. 1994. El cultivo de la mora. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Costa Rica. 80 p
- FAO. 2016. World fertilizer trends and outlook to 2019. Summary Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Fernández, S., Cotos, T., Roca, J. y Ordóñez, C. 2016. Geographically Weighted Principal Components Analysis to assess diffuse pollution sources of soil heavy metal: Application to rough mountain areas in Northwest Spain. *Geoderma*. In Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.012>.
- Ferreira, D.F. 2008. Estadística multivariada. Lavras, Universidad Federal de Lavras.
- Fidalski, J., Tormena, C. A.y Scapim, C. A. 2007. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. *Rev. Bras. Ci. Solo* 31(1), 9 - 19.
- Fotheringham, A. S., Brunson, C. y Charlton, M. 2002. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships. Chichester, UK: Wiley.
- Franco, G., J.A. Bernal, J.L. Gallego, J.E. Rodríguez, N. Guevara y M. Londoño. 1996. Agronomía del cultivo de la mora. pp. 1- 18. En: Memorias 1er Seminario nacional de frutales de clima frío moderado. Manizales, octubre 10 y 11 de 1996. Corpoica, Manizales. 235 p.
- Franco, G., Gallego, J., Tamayo, A., Heredia, L. y Medina, G. 2000. Fertilización de la mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth) en zonas frías del departamento de Caldas. En: Memorias del tercer seminario frutales de clima frío moderado. Centro de Desarrollo Tecnológico de Frutales C.D.T.F. Manizales. p. 81-87.
- García, M.C. 2001. La agroindustria de la mora. Alternativas viables para los fruticultores. *Tecnología para el Agro* 1(2), 15-17.

- Giraldo, R. 2002. Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística. 94 p.
- Goli- Kalanpa, E., Roozitalab, M. y Malakouti, M. 2008. Potassium Availability as Related to Clay Mineralogy and Rates of Potassium Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39, 2721- 2733.
- Gollini, I., Lu, B., Charlton, M., Brunsdon, C. y Harris, P. 2015. GWmodel: An R Package for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models. *Journal of Statistical Software*, 63(17), 1-50. URL: <http://www.jstatsoft.org/v63/i17/>.
- González, J., Morales, C. y Obando, F. 2010. Indicadores visuales de deficiencias nutricionales en el cultivo de mora sin espinas (*Rubus glaucus*) bajo condiciones controladas. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. ISBN 978-958-8598-03-1.
- Götze, J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz – geological interpretation and technical application. *Mineralogical Magazine* 73, 645–671.
- Götze, J. 2012. Classification, mineralogy and industrial potential of SiO<sub>2</sub> minerals and rocks. En: Götze, J. y Möckel, R. (Eds.). *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. 1–27 pp. Springer-Verlag, Berlin.
- Grijalba, C., Calderón, L. y Pérez, M. 2010. Rendimiento y calidad de la fruta en mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.), con y sin espinas, cultivada en campo abierto en Cajicá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 6(1), 24- 41.
- Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J. y Wu, L. 2014. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils. *Environ Sci Pollut Res*. DOI: 10.1007/s11356-014-3542-z.
- Harris, P., Brunsdon, C. y Charlton, M. 2011. Geographically weighted principal component analysis. *International Journal of Geographical Information Science* 25(10), 1717. 1736.
- Harsh, J., Chorover, J. y Nizeyimana, E. 2002. Allophane and imogolite. En: Dixon, J. y Schulze, D. (Eds.). *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America Book Series 7, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. 291- 322 pp.

- 
- Haynes, R. y Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 123- 137.
- Hiradate, S. y Wada, S. 2005. Weathering process of volcanic glass to allophane determined by <sup>27</sup>Al and <sup>29</sup>Si solid state NMR. *Clays and Clay Minerals* 53(4) 401- 408.
- Hoef, R., Nafziger, E., Johnson, R. y Aldrich, S. 2000. Modern corn and soybean production, MCSP Publications. Champaign, Illinois.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca 1:100.000. IGAC. Subdirección de Agrología. Bogotá.
- International Plant Nutrition Institute- IPNI. 2010. Soil pH and the availability of plant nutrients. *Plant nutrition Today* Fall N° 2.
- Islabao, G., Alves, M., Roldao, L., Vahl, L y Timm, L. 2013. Characterization of soil chemical properties of strawberry fields using principal component analysis. *R. Bras. Ci. Solo* 37(1), 168-176.
- Jackson, J. 1991. *A User's Guide to Principal Components*. Wiley & Sons, New York.
- Jacobs, D. y Timmer, V. 2005. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests* 30, 147- 166.
- Jansen, J., Hoefsloot, H., van der Greef, J., Timmerman, M., Westerhuis, J. y Smilde, A. 2005. ASCA: analysis of multivariate data obtained from an experimental design. *J. Chemometr.* 19, 469- 481.
- Jaramillo, D. 2005. Efecto de la variabilidad sistemática en experimentos de fertilización. Primera siembra. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 58(1), 2717-2732.
- Jaramillo, D. 2006. Efecto de la variabilidad sistemática en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 59(1), 3147-3165.
- Jaramillo, D. F. 2011. *El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 553 p.

- Jiménez, J., Lorenz, K. y Lal, R. 2011. Organic carbon and nitrogen in soil particle- size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica- implications for within- site soil organic carbón stabilization. *Catena* 86, 171- 191.
- Jombart, T., Devillard, S., Dufour, A. y Pontier, D. 2008. Revealing cryptic spatial patterns in genetic variability by a new multivariate method. *Heredity* 101, 92. 103.
- Junqueira, L., Quaggio, J., Cantarella, H, y Vicari, E. 2011. Potassium fertilization for pineapple: effects on soil chemical properties and plant nutrition. *Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal* 23(2), 627- 636.
- Junqueira, L., Quaggio, J., Cantarella, H. y Vicari, E. 2011. Potassium fertilization for pineapple: effects on soil chemical properties and plant nutrition. *Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal* 33(2), 627- 636.
- Karamanaos, R. Flore, N., Harapiak, J. y Stevensos, F. 2014. The Impact of Phosphorus Fertilizer Placement on Crop Production. *Soil and Crops*.
- Kjellander, R., Marcelja, S., Pashley, R.M. y Quirk, J.P. 1988. Double-layer ion correlation forces restrict calcium-clay swelling. *Journal of Physical Chemistry* 92, 6489-6492.
- Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., Pineros, M.A. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminium tolerance and phosphorus efficiency. *Annual Review of Plant Biology*. 55, 459-493.
- Komsta, L. y Novomestky, F. 2015. moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests. R package version 0.14. <https://CRAN.R-project.org/package=moments>
- Kumar, S., Lal, R. y Lloyd, C. 2012. Assessing spatial variability in soil characteristics with geographically weighted principal components analysis. *Comput Geosci* 16, 827–835.
- Lamers, R., Degroot, L., Spies-Faber, E., Jellema, R., Kraus, V., Verzij, N., Tekoppele, J., Spijksma.G., Vogels, J., van der Greef, J. y van Nesselrooij, R. 2003. Identification of disease and nutrient-related metabolic fingerprints in osteoarthritic guinea pigs, *J. Nutr.*, 133, 1776–1780.



- Legendre, P. 1993. Spatial autocorrelation: a trouble or new paradigm? *Ecology* 74, 1659-1673.
- Leiva, F.R. 2003, La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. En: Memorias VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos, julio 2-5 de 2003, Bogotá.
- Li, Z., Cheng, J. Y Wu, Q. 2015. Analyzing regional economic development patterns in a fast developing province of China through geographically weighted principal component analysis. *Letters in Spatial and Resource Sciences* 9(3), 233-245.
- Liu, Z., Rong, Q., Zhou, W. y Liang, G. 2017. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil. *PLoS One* 12(3), e0172767. doi:10.1371/journal.pone.0172767.
- Lizcano, A., Herrera, M. C. Santamarina, J. C. 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 6(2), 167- 198.
- Lloyd, C. D. 2010. Analysing population characteristics using geographically weighted principal components analysis: a case study of Northern Ireland in 2001. *Computers, Environment and Urban Systems* 34(5), 389-399.
- Loaiza, J., Stoops, G., Poch, R. y Casamitjana, M (Eds.). 2015. Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Fondo Editorial Pascual Bravo. Medellín, Colombia. 384 p.
- Lobo, M. 2006. Recursos genéticos y mejoramiento de frutales andinos: una visión conceptual. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 7, 40 -54.
- Lombin, L.G., Adepetu, J. y Ayotade, K. 1991. Organic fertilizer in the Nigerian agriculture: Present and future. FMNAR, Abuja, Nigeria.
- Lopes, A.S. y Guilherme, L.R.G. 2004. Interpretação de análise de solo - Conceitos e aplicações. 3.ed. São Paulo, Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA. 50p.
- Lu, S., Malik, Z., Chen, D. y Wu, F. 2014. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. *Catena* 123, 79- 87.

- Mandal, U. K., Warrington, D. N., Bhardwaj, A. K., Bar-Tal, A., Kautsky, L., Minz, D. y Levy, G. J. 2008. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis. *Geoderma*, 144, 189-197.
- Marschner P. 2012. *Marschners's mineral nutrition of higher plants*. London: Elsevier.
- Martínez, A., Beltrán, O., Velastegui, G., Ayala, G., Jácome, R. y Yáñez, W. 2007. Manual de cultivo de la mora de castilla (*Rubus glaucus* B.). Primera edición. INIAP-UTA. Ambato. Ecuador. 36 p.
- Martínez, R. 1994. Control de la correlación espacial en experimentos de campo en el sector agrícola. *Agronomía Colombiana* 11(1), 83-89.
- Martín-García, J. M., Márquez, R., Delgado, G., Sánchez- Marañón, M. y Delgado R. 2015. Relationships between quartz weathering and soil type (Entisol, Inceptisol and Alfisol) in Sierra Nevada (southeast Spain). *European Journal of Soil Science* 66, 179- 193.
- Masto, R. E., P. K. Chhonkar, D. Singh y A. K. Patra. 2009. Changes in soil quality indicators under McCauley, A., Jones, C. y Olson-Rutz, K. 2017. Soil pH and organic matter. *Nutrient Management Module No. 8*. Montana State University Extension.
- Mondal, S., Singh, R., Patra, A. y Dwivedi, B. 2015. Changes in soil quality in response to short-term application of municipal sewage sludge in a typic haplustept under cowpea-wheat cropping system. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 4, 37- 41.
- Morales, C.S. y Villegas, B. 2012. Mora (*Rubus glaucus* Benth.). En: Fischer, G. (Ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico*. Produmedios, Bogotá.
- Moran, P. 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika* 37, 17–23.
- Munns, R., Goyal, S. y Passioura, J. 2005. *Salinity stress and its mitigation*. University of California, Davis. 19 p.
- Muñoz, J., Martínez, L. y Giraldo, R. . 2006. Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) *Agron, Colomb.* 24(2) 355- 366.

- Nanzyo, M. 2002. Unique Properties of Volcanic Ash soils. En: Association of International Research Initiatives for Environmental Studies (AIRIES). Global environmental research. Volcanic ashes and their soils 6 (2), 99-112.
- Neumann G. y Romheld V. 2001. Root induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere. En: Waisel Y., Eshel A. and Kafkafi U. (Eds), Plant Roots: The Hidden Half. Tercera edición. Marcel Dekker, New York, NY, pp. 617- 649.
- Ochoa, W., Suárez, S. y Sadeghian, S. 2003. Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en Andisoles de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 54(2), 179- 189.
- Oliveira, J., Chaves, L., Queiroz, J., Luna, J. 1999. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 23(4), 783- 789.
- Orozco, R. y Muñoz, R. 2012. Efecto de abonos orgánicos en las propiedades químicas del suelo y el rendimiento de la mora (*Rubus adenotrichus*) en dos zonas agroecológicas de Costa Rica. Tecnología en Marcha 25 (1), 16-31.
- Papadakis, J. 1937. Method statistique pour des expériences sur champ. Bulletin Institute Amélior. Plantes à Salonique, 23.
- Parfitt, R.L. 1989. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. Journal of Soil Science 40, 359–369.
- Parkin, T. 1993. Spatial variability of microbial processes in soil: a review. Journal of Environment Quality 22, 409- 417.
- Pebesma, E.J. y R.S. Bivand, 2005. Classes and methods for spatial data in R. R News 5 (2), <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>.
- Radulov, I., Berbecea, A., Sala, F., Crista, F. y Lato, A. 2011. Mineral fertilization influence on soil pH, cationic exchange capacity and nutrient content. Res. J. Agric. Sci. 43(3): 160-165.
- Ramírez, M., Roveda, G., Bonilla, R., Peñaranda, A., Díaz, C., Tamayo, A. y Navas. G. 2008. Evaluación de biofertilizantes mixtos. En: Roveda, G.; Cabra, L. y Ramírez M. (Eds.). Uso de microorganismos con potencial como biofertilizantes en el cultivo de mora. Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. Centro de Investigación Tibaitata. Mosquera, Colombia. 52- 58 pp.

R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Roholla, S., Shahsavari, M. y Rezaei, M. 2011. A General Overview On Manganese (Mn) Importance For Crops Production. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5(9), 1799- 1803.

Roveda, G. Ramírez, M. y Cabra, L. 2008. Potencial de microorganismos como biofertilizantes. En: Roveda, G.; Cabra, L. y Ramírez M. (Eds.). Uso de microorganismos con potencial como biofertilizantes en el cultivo de mora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. Centro de Investigación Tibaitata. Mosquera, Colombia. 44- 51 pp.

Roy, R.N., Finck, A., Blair, G. y Tandon, H. 2006. Plant nutrition for food security – a guide. Fertilizer and plant nutrition Boletín 16, pp 43-44

Rozhkov, V. 2013. Soil classification: no discussions. Byull. Pochv. Inst. im V.V. Dokuchaeva 72, 47- 64.

Saldarriaga L. M. 2002. Efecto de la variabilidad espacial en los resultados del análisis de varianza de la producción de palma joven (*Elaeis guineensis* Jacq.). Trabajo de grado (Ingeniería Agronómica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 66 p.

Sánchez, J. A. 2015. Análisis mineralógico y su interpretación en la fertilidad del suelo. En: Torrente, A. (Ed.). Seminario Nacional Actualización en Fertilidad del Suelo. Primera edición. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. 101- 122 pp.

Sánchez, J. A. 2016. Mineralogía y génesis de los suelos desarrollados sobre materiales no consolidados en el abanico diluvial de Fusagasugá, Colombia. Trabajo presentado como requisito para optar al título de Doctor en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Bogotá. 216 p.

- 
- Schabenberger, O. y Gotway, C. 2005. Statistical methods for spatial data analysis: CRC Press, Boca Raton, FL.
- Schneider, A., Morvan, X., Saby, N., Cancés, B., Ponthieu, M., Gommeaux, M. y Gommeaux, B. 2016. Multivariate spatial analyses of the distribution and origin of trace and major elements in soils surrounding a secondary lead smelter. *Environ Sci Pollut Res* 23, 15164- 15174.
- Sena, M. Frighetto, R., Valarini, P., Tokeshi, H. y Poppi, R. 2002. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. *Soil Tillage Res.* 67(2), 171- 181.
- Shaviv, A., Mohsin, M., Pratt, P. y Mattigod, S. 1985. Potassium fixation characteristics of five southern California soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1105- 1109.
- Shoji, S., Nanzyo, M. y Dahlgren, R.A. 1993. *Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization.* Elsevier Science. Amsterdam.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. y Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79, 7-31.
- Skrbic, B. y Mladenovic, N. 2007. Principal component analysis for soil contamination with organochlorine compounds. *Chemosphere* 68, 2144- 2152.
- Smilde, A., Jansen, J., Hoefsloot, H., Lamers, R., van der Greef, J. y Timmerman, M. 2005. ANOVA-simultaneous component analysis (ASCA): a new tool for analyzing designed metabolomics data. *Bioinformatics* 21(13), 3043- 3048.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sokal, R.R. y Rohlf, F.J. 1995. *Biometry, The Principles and Practice of Statistics in Biological Research* (3rd edn). W.H. Freeman and company: New York.
- Sora, A. Fischer, G. y Flórez, R. 2006. Almacenamiento refrigerado de frutos de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) en empaques con atmósfera modificada. *Agron. Colomb.* 24 (2), 306- 316.

- Sparks, D. L. 2001. Kinetics of soil chemical processes. Academic Press, Inc. 92101. San Diego, CA. 30- 60.
- Ståhle, L. y Wold, S. 1990. Multivariate analysis of variance (MANOVA). *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 9, 127- 141.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Sciences Society of America, inc. Madison. Wisconsin, USA. 184 p.
- Stoops, G. 2007. Micromorphology of soils derived from volcanic ash in Europe: a review and synthesis. *European Journal of Soil Science* 58, 356–377.
- Stoops, G., Marcelino, V. y Mees, F (Eds.). 2010. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, Amsterdam, Holanda. 753 p.
- Tamayo, V. e Hincapié, Z. 2000. Fertilización de la mora de castilla (*Rubus glaucus* B.), en clima moderado de departamento de Antioquia. En: Memorias Tercer Seminario de Frutales de Clima frío Moderado, Manizales, 88- 91 pp.
- Tamura, N., Larry, A. y George C. 1988. An Investigation of the Validity and Usefulness of Trend Analysis for Field Plot Data. *Agronomy Journal* 80, 712- 718.
- Tariq, M. y Mott, C. J. B. 2006. Influence of applied calcium-boron ratio on the solubility of nutrient elements in soil. *Journal of Agricultural and Biological Science* 1(3), 1-7.
- Tedla, A. 2001. Direct and residual effects of organic and inorganic fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. Tesis como requisito parcial para obtener el título de doctor. Department of Plant Production and Soil Science. Faculty of Natural and Agricultural Sciences. University of Pretoria. 122 p.
- Tening, A., Foba-Tendo, J., Yakum-Ntaw, S. y Tchuenteu, F. 2013. Phosphorus fixing capacity of a volcanic soil on the slope of mount Cameroon. *Agric. Biol. J. N. Am.* 4(3), 166- 174.
- Tennekes, M. 2017. tmap: Thematic Maps. R package version 1.8-1. <https://CRAN.R-project.org/package=tmap>.

- Vacca, A., Adamo, P., Pigna, M., Violante, P. 2003. Genesis of tephra-derived soils from the Roccamonfina Volcano, Central-Southern Italy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 198-207.
- Vayas, J. 2002. Niveles de fertilización en el cultivo de mora de castilla (*Rubus glaucus*). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Agronómica, Ambato, Ecuador.
- Velásquez, G., Calabi-Floody, M., Poblete-Grant, P., Rumpel, C., Demanet, R., Condrón, L. y Mora, M. 2016. Fertilizer effects on phosphorus fractions and organic matter in Andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(2), 294- 304.
- Vepraskas, M.J. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. SSSA, Madison, WI. doi:10.2136/2003.guidelinesforanalysis.
- Vis, D., Westerhuis, J., Smilde, A. y van der Greef, J. 2007. Statistical validation of megavariate effects in ASCA. *BMC Bioinformatics* 8(322).
- Walkley, A. y Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-37.
- Warrick, A.W. y Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hillel, D. (Ed). *Application of soil physics*. New York, Academic Press. pp. 319-344.
- Yruela, I. 2005. Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17(1), 145- 156.
- Zas, R. 2008. Autocorrelación espacial y el diseño y análisis de experimentos. En: Maestre, F., Escudero, A. y Bonet, A. (Eds.). *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*. Editorial Dykinson. Madrid, España. 542-590 pp.
- Zhang, N., W. Mahoua y N. Wang. 2002. Precision agriculture, a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 36, 113-132.
- Zwanenburg, G., Hoefsloot, H., Westerhuis, J., Jansen, J. y Smilde, A. 2011. ANOVA–principal component analysis and ANOVA–simultaneous component analysis: a comparison. *Journal of Chemometrics* 25, 561- 567.