



CARACTERIZACIÓN AGROQUÍMICA DEL SUELO DE 15 FINCAS CON PROYECCIÓN HACIA LA TRANSFORMACIÓN AGROECOLÓGICA, EN EL MUNICIPIO SANTA MARÍA, BOYACÁ

AGROCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE SOIL FOR 15 FARMS WITH A PROJECTION TOWARDS THE AGROECOLOGICAL TRANSFORMATION, IN THE MUNICIPALITY OF SANTA MARÍA, BOYACÁ

Belcy Hernández Tabaco • belsy.hernandez@unipamplona.edu.co
Ingeniera Ambiental, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

Leónides Castellanos González • lcastell@gmail.com
PhD. En Ciencias Agrícolas, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

Citación: Hernández, B., Castellanos, L. (2022). Caracterización agroquímica del suelo de 15 fincas con proyección hacia la transformación agroecológica, en el municipio Santa María, Boyacá. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 15 – 32. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.3683>

RESUMEN

Contextualización: el conocimiento anticipado de la calidad de los suelos no cultivados previamente es de gran importancia para decidir la implementación de los cultivos y la elaboración de los planes de fertilización.

Vacío de conocimiento: el estudio contribuyó a la adquisición de conocimiento sobre la condición y calidad de los parámetros fisicoquímicos de los suelos, como paso previo para diseñar prácticas agrícolas nuevas, donde los agricultores no contaban con los respectivos análisis del suelo y desconocían que estos pueden presentar una composición heterogénea, incluso a distancias relativamente cortas.

Propósito del estudio: el objetivo fue caracterizar agroquímicamente los suelos en 15 fincas del municipio de Santa María para conocer su fertilidad natural. Allí se implementarán 3 modelos agroecológicos en el marco del proyecto "Desarrollo estratégico agroecológico para el fortalecimiento del sector productivo en el Departamento de Boyacá".

Metodología: las muestras se recolectaron en el mes de junio de 2019, una vez realizado su procesamiento en el laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados: pH (método potenciométrico en agua o en NaF), acidez intercambiable (KCl 1N), Al intercambiable, textura (Bouyucos), CO (Walkley Black %p/v) P (Bray II), S (extracción con Ca(HPO₄), bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na), capacidad de intercambio catiónico, elementos menores (Fe, Cu, Mn, Zn, por el método de Olsen modificado), conductividad eléctrica, N disponible por los protocolos establecidos en el laboratorio en forma de nitrato y amonio intercambiable (KCl), relaciones iónicas en el suelo (Ca/Mg, Ca+Mg/K, Ca/K, Mg/K).

Resultados y conclusiones: los resultados obtenidos en el análisis de los suelos muestran deficiencias significativas en cuanto a los macroelementos primarios N, P, K y Ca; sin embargo, evidencian que los suelos cuentan con buena capacidad de intercambio catiónico, lo que favorece la retención e intercambio de nutrientes para las plantas. Por lo tanto, se concluye que los

suelos de las fincas estudiadas son adecuados para la implementación de los modelos agroecológicos, a pesar de las deficiencias presentadas por los elementos agroquímicos. Estas evidencias deberán tenerse en cuenta en los planes de fertilización para suplir estas deficiencias, con base en los requerimientos de cada cultivo. Esto se puede conseguir

mediante la aplicación de enmiendas orgánicas, rocas fosfóricas, calcáreas, entre otras. 

Palabras clave: Agroecología; Fertilidad natural; Homogeneidad; Nutrientes

ABSTRACT

Contextualization: Advance knowledge of soil quality is very important to decide the implementation of crops and elaborate fertilization plans.

Knowledge gap: The study contributed to the acquisition of knowledge about the condition and quality of soil, and its physicochemical parameters, as a preliminary step to designing new agricultural practices, in places where farmers did not count with soils analysis, and they were unaware that soils can have a heterogeneous composition, even at relatively short distances.

Purpose: The objective was to characterize agro-chemically the soils in 15 farms in the municipality of Santa María to know their natural fertility, in a place where 3 agroecological models will be implemented as part of the project "Strategic agroecological development for the strengthening of the productive sector in the Department of Boyacá".

Methodology: The samples of the soils were collected in June 2019. After processing in the laboratory, the following results were obtained: pH (potentiometric method in water or in NaF), exchangeable acidity (KCl 1N), Al exchangeable, texture (Bouyucos), CO

(Walkley Black %p/v) P (Bray II), S (extraction with $\text{Ca}(\text{HPO}_4)$), interchangeable bases (Ca, Mg, K, Na), cation exchange capacity, minor elements (Fe, Cu, Mn, Zn, by the modified Olsen method), electrical conductivity, N available by laboratory protocols in the form of nitrate and exchangeable ammonium (KCl), ionic relationships in soil (Ca/Mg, Ca+Mg/K, Ca/K, Mg/K).

Results and conclusions: The results obtained, after the soil analysis, showed significant deficiencies in the primary macro-elements N, P, K and Ca. However, there was evidence that the soils have good capacity of cation exchange, and that stimulate the retention and exchange of nutrients for the plants. Therefore, it was concluded that the soils that were studied are suitable for the implementation of agroecological models, despite the deficiencies presented by the agrochemical elements. These evidence should be considered in the fertilization plans to fill these deficiencies, based on the requirements of each crop. These can be achieved by applying organic amendments, phosphoric rocks, calcareous, among others. 

Keywords: Agroecology; Natural fertility; Homogeneity; Nutrients



RESUMEN GRÁFICO



Resumen gráfico: interpretación de los resultados obtenidos de las muestras de suelo para las 15 unidades productivas en estudio y su respectiva caracterización agroquímica. **Fuente:** Autores.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo provee importantes funciones ambientales, dentro de las cuales se resalta ser el sustento de alimento para las plantas; almacenar nutrientes; poseer y albergar materia orgánica proveniente de restos animales y vegetales; y ser el hábitat de diversos organismos que transforman la materia orgánica presente en el mismo (Silva y Correa, 2009). Por estos servicios, es esencial buscar estrategias para el aprovechamiento y uso eficiente de este recurso, ya que se considera un componente importante del ambiente. Además, un bien natural no renovable debido a que su recuperación y formación tarda miles de años (Dorronsor, 2007).

La degradación de la tierra (por ejemplo, la erosión del suelo) es causada por la reducción de los nutrientes del suelo y la degradación de sus propiedades químicas y físicas. Por lo tanto, es importante adoptar un plan integral para la gestión de la fertilidad de los suelos que permita aumentar al máximo la producción de los mismos. La relación entre la erosión del suelo y la productividad registra una pérdida media mundial de 0,3% del rendimiento anual de los cultivos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). El uso del suelo a nivel nacional registra un 9,1%, para vocación agrícola, el 9% se dedica al sector ganadero, el 19% al sector agroforestal y el 62,5% se dedica al sector forestal; por lo tanto, se

estima una utilización del suelo del 37,2 % para uso agropecuario, eso indica un nivel de afectación del 80 % por la erosión del suelo, debido a las malas prácticas agrícolas en el uso del suelo (Arteaga et al., 2016).

Antes de iniciar una actividad agrícola o instalar una huerta es muy importante conocer la condición en que se encuentra el suelo, debido a que es el lugar donde se desarrollan las raíces y se encuentran los elementos minerales que utilizan las plantas para su crecimiento y producción. En consecuencia, cada tipo de cultivo tiene unos requerimientos nutricionales y el suelo contiene esos elementos en cantidades variables que pueden o no satisfacer la demanda nutricional. Por ende, la importancia de conocer el tipo de suelo e implementar técnicas adecuadas, teniendo como premisa que la productividad de los suelos es una cuestión de sostenibilidad (FAO, 2013).

Teniendo en cuenta la necesidad de que las plantas tengan una buena nutrición, hay que decir que los macronutrientes y micronutrientes son importantes para el desarrollo vegetativo de las plantas, debido a que estas viven en un ambiente iónico muy diluido en el que logran nutrirse y, por lo tanto, completar su ciclo de vida. Esto es posible gracias a la capacidad que tienen de acumular en su interior iones de elementos esenciales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, boro, zinc y cobre. Estos nutrientes están involucrados en funciones metabólicas o estructurales de las plantas, en las cuales no pueden sustituirse. La carencia de uno de los nutrientes produce una serie de síntomas de deficiencia y, si no son corregidas a tiempo, pueden conllevar a que el crecimiento de la planta se detenga, y en casos extremos causar la muerte (Piaggese, 2004).

Por otra parte, y teniendo en cuenta la cuestión de la sostenibilidad, tiene sentido mencionar que la agroecología consiste en el manejo ecológico del ecosistema, presentando alternativas a la actual crisis de modernidad, con propuestas de desarrollo participativo (Toledo, 1990). Además, incorpora un enfoque de la agricultura más ligado al entorno natural y más sensible socialmente, centrada en una producción sustentable ecológicamente, oponiéndose

a la reducción de la biodiversidad y uso de todo agroquímico, con la consiguiente contaminación y destrucción del ambiente, al excesivo e inadecuado uso de la mecanización y el riego (Martínez, 2004). De acuerdo con ese paradigma, esta investigación tiene como objetivo caracterizar agroquímicamente los suelos seleccionados para conocer la fertilidad natural de los mismos, en los 15 predios beneficiados por el proyecto "Desarrollo estratégico agroecológico para el fortalecimiento del sector productivo en el Departamento de Boyacá" (municipio de Santa María), con la finalidad de valorar las necesidades de nutrientes para los futuros modelos agroecológicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en el municipio de Santa María - Boyacá, abarcando 15 fincas con suelos no cultivados previamente que están dedicados, en su gran mayoría, a la preservación de pastos y cultivos abandonados. Estas fincas pertenecen a pequeñas familias productoras, cuyas prácticas agropecuarias se sustentan en el tradicionalismo y el predominio de monocultivos. Es en estos predios donde se pretende desarrollar tres modelos agroecológicos, constituidos por tres sistemas agroforestales, que se implementarán en las parcelas agroecológicas, las cuales contarán con un manejo agroecológico sostenible. Cada sistema se comparará con un cultivo de control (monocultivo) que se establecerá en la parcela testigo, siguiendo el manejo tradicional de los agricultores de la región. Estos modelos buscan la transformación de los sistemas de producción convencionales actuales a sistemas agroecológicos sostenibles.

Los futuros modelos agroecológicos son: modelo 1 (Leucaena-Aguacate-Frijol), modelo 2 (Balso-Naranja-Frijol), modelo 3 (Leucaena/Plátano/Maíz). Los cuales se implementarán en los suelos de las fincas objeto de investigación (Tabla 1).

La investigación se fundamentó en un diseño experimental cuantitativo, completamente aleatorizado, con dos factores: factor modelo (tres tipos de sistemas agroforestales) y el factor parcela (agroecológica y testigo), con el propósito de ver las diferencias en las propiedades de



los suelos previamente a la implementación de los modelos agroecológicos y las parcelas testigos. El análisis del nivel de fertilidad de los suelos se realizó en el mes de junio de 2019, de la siguiente forma: se tomaron muestras en las 15 ha, cada hectárea se dividió en 0,5 ha para la parcela agroecológica

y 0,5 ha para la parcela testigo, es decir, 2 muestras por finca, para un total de 30 muestras. Cada muestra estuvo compuesta por 15 submuestras, tomadas hasta una profundidad de 30 cm, para las dos parcelas. Las muestras se enviaron al laboratorio Dr. Calderón Labs. en la ciudad de Bogotá.

Tabla 1. Localización de predios caracterizados en el municipio de Santa María.

Finca	Modelo Agroecológico para implementar	Coordenadas Geográficas	
		N	W
Tierra Grata	1	4°52'10,6"	73°13'08,1"
Vista Hermosa	1	4°51'56,1"	73°13'04,0"
El Convento	1	4°54'00,8"	73°13'25,5"
El Porvenir I	1	4°52'16,4"	73°13'13,6"
El Paraíso	1	4°51'38,5"	73°14'47,9"
El Dorado	2	4°43'50,9"	73°17'02,6"
Gualandayes	2	4°44'16,3"	73°16'54,6"
Cachipay	2	4°54'25,0"	73°13'46,9"
La Argentina	2	4°51'21,2"	73°15'46,1"
Los Cafeteros	2	4°54'11,9"	73°13'24,3"
Porvenir II	3	4°52'07,8"	73°13'05,2"
La Vega I	3	4°51'41,3"	73°13'45,6"
La Vega II	3	4°52'04,7"	73°13'37,6"
Santa Cecilia	3	4°54'09,1"	73°13'25,0"
El Salvador	3	4°54'11,9"	73°13'21,2"

Fuente: Autores

Para cada parcela se mezclaron las submuestras recogidas en un recipiente limpio, donde se recolectó 1.3 kg de muestra. Además, se marcaron clara e inmediatamente las muestras, según la finca y la parcela. Se enviaron al laboratorio certificado, donde se obtuvieron los resultados de las variables fisicoquímicas de los suelos. En cada parcela seleccionada por finca se determinaron propiedades físicas, entre las cuales se destaca el porcentaje de arcilla, limo y arena. Así mismo, se estableció la clasificación de la textura de acuerdo con el triángulo textural de USDA, asumido también por la FAO (Gee y Bauder, 1986). Para categorizar los niveles bajos o deficientes de cada elemento analizado, se tuvieron en cuenta los niveles críticos de los elementos en los suelos, suministrados por el laboratorio Dr. Calderón Labs (Tabla 2).

2.1 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para todas las variables fisicoquímicas del suelo de las parcelas agroecológicas y testigos, lo cual permitió determinar los niveles bajos, deficientes y óptimos. Por otra parte, se valoró si existe variación u homogeneidad entre los parámetros fisicoquímicos de las 15 fincas. Una vez comprobado el cumplimiento del supuesto de normalidad para cada variable (por medio de la prueba Shapiro-Wilks y la igualdad de las varianzas de error por la prueba de Levene), se compararon las variables de los suelos donde se implementarán las parcelas agroecológicas, con las variables de los suelos destinados para las parcelas testigos por la prueba T de Student. Cuando no se cumplió el supuesto de normalidad, se compararon las variables por la prueba no paramétrica Kolmogorov-Smirnov. En ambos casos con una probabilidad de error de $P < 0,05$.

Tabla 2. Niveles críticos de las variables agroquímicas en suelos.

ELEMENTOS	DEFICIENTE	BAJO	MEDIO	ALTO
pH	4,6	5,4	7	8,2
Carbón Orgánico (%)	1	4	16	64
Fósforo (ppm)	13	26	156	312
Potasio (meg/100 ml)	0,16	0,48	0,96	1,94
Calcio (meg/100 ml)	1,5	6	15	30
Magnesio (meg/100 ml)	1	2	4	8
Sodio (meg/L E.S)	0,2	0,4	4,8	9,6
Aluminio (meg/100 ml)	0	0,12	0,24	0,48
Hierro (ppm)	100	200	800	1200
Manganeso (ppm)	15	30	60	120
Cobre (ppm)	0,25	0,5	1	4
Zinc (ppm)	1	2	5	20
Boro (ppm)	0,3	0,6	1,2	1,8
Azufre (ppm)	15	30	60	160
Nitrógeno-NH ₄ (ppm)	6	12	24	48
Nitrógeno NO ₃ (ppm)	40	80	160	320
Nitrógeno Total (%)	0,05	0,2	0,8	3,2
C.I.C. (meg/100 ml)	0	10	20	40
Saturación Hum. (%)	10	20	40	80
C.E. (ms/cm)	0,5	1	2	4
Rel (C/N)	5	10	20	40
Cloruros (meq/lit.E)	1	2	3	5

Fuente: Autores.

Para las variables que cumplieron los supuestos, se aplicó el análisis de varianza ANOVA unifactorial para determinar diferencias entre los tres modelos agroecológicos y después entre las fincas dentro de un mismo modelo. Las medias se compararon por la prueba de Tukey con un nivel de significación del 0.05. El procesamiento de los datos se realizó mediante el software SPSS Statistics for Windows, Versión 21.0. (International Business Machines Corporation [IBM], 2020).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Condiciones y propiedades químicas de los suelos para la implementación de los modelos agroecológicos

En las fincas donde se implementará el modelo 1 (Leucaena/Aguacate/Frijol) se

evidenció que el 100% de los suelos en las parcelas agroecológicas presentaron deficiencias para el K, Na, P, N-NO₃, S y Cu (Tabla 3). Así mismo, en el 80% de los suelos de estas parcelas, el Ca, Mg, y B se clasificaron como deficientes; mientras que el 20% restante presentó contenidos bajos. En cuanto al Fe, se observó que el 80% de los suelos se catalogaron con niveles bajos y, a su vez, el 40% de las fincas demostraron deficiencias para el Mn. En las parcelas testigos, donde se cultivará aguacate, se encontró que los suelos presentaron deficiencias para los mismos elementos químicos de las parcelas agroecológicas, con una similitud porcentual.



Tabla 3. Porcentaje de niveles bajos y deficientes de los elementos y propiedades químicas de los suelos del modelo 1.

		Nutrientes															
Parcelas (%)	Niveles	K	Ca	Mg	Al	Na	P	N-NH ₄	N-NO ₃	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B		
Agroecológicas	Bajo	0	20	20	0	0	0	0	0	0	80	40	0	0	20		
	Deficiente	100	80	80	0	100	100	0	100	100	0	40	100	0	80		
Testigos	Bajo	40	40	40	0	0	0	0	0	0	60	20	0	0	20		
	Deficiente	80	60	60	0	100	100	0	100	100	20	40	100	0	80		
Propiedades Químicas				pH				C.E				C.I.C					
Agroecológicas	Bajo					40				0				0			
	Deficiente					60				100				0			
Testigos	Bajo					60				0				0			
	Deficiente					40				100				0			

K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; P: fósforo; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; C. E.: conductividad eléctrica; C. I. C.: capacidad de intercambio catiónico

Fuente: autores.

Las deficiencias de N-NO₃, Ca, P, K, Mg y S indicaron que los suelos donde se implementará el modelo 1 tienen baja fertilidad natural. Además, debido a la deficiencia del Cu, se pueden asemejar a suelos de textura gruesa y con bajo contenido de materia orgánica, siendo esta última, en algunos casos, una limitante para el desarrollo de los cultivos (Lucas y Knezek, 1972). Por lo tanto, esto debe tenerse en cuenta, tanto en las parcelas agroecológicas como en las testigos, para la elaboración de los planes de fertilización.

Respecto a las fincas donde se implementará el modelo 2 (Balso/Naranja/Frijol), se evidenció que el 100% de los suelos de las parcelas agroecológicas para el Ca, Mg, Na, P, N-NO₃, S y Cu se caracterizaron como deficientes (Tabla 4). Igualmente, el K, en el 80 % de los suelos de estas parcelas, demostró deficiencias. Por otra parte, en las parcelas testigos donde se sembrará naranja Valencia, se encontró que los suelos presentan deficiencias para los elementos químicos K, Mg, Na, P, N-NO₃, S y Cu en el 100% de las fincas.

Tabla 4. Porcentaje de niveles bajos y deficientes de los elementos y propiedades químicas de los suelos del modelo 2.

		Nutrientes															
Parcelas (%)	Niveles	K	Ca	Mg	Al	Na	P	N-NH ₄	N-NO ₃	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B		
Agroecológicas	Bajo	20	0	0	0	0	0	20	0	0	60	0	0	0	40		
	Deficiente	80	100	100	0	100	100	0	100	100	0	60	100	0	60		
Testigos	Bajo	0	20	0	0	0	0	0	0	0	60	60	0	0	20		
	Deficiente	100	80	100	0	100	100	0	100	100	0	0	100	0	80		
Propiedades Químicas				pH				C.E				C.I.C					
Agroecológicas	Bajo					20				0				0			
	Deficiente					80				100				0			
Testigos	Bajo					40				0				0			
	Deficiente					60				100				0			

K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; P: fósforo; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; C. E.: conductividad eléctrica; C. I. C.: capacidad de intercambio catiónico

Fuente: autores.

El B se halló en menos cantidades dentro del rango deficiente, para el 80% de las parcelas testigos y un 60% de las parcelas agroecológicas; mientras que el Fe se clasificó en el 40% de los suelos de las dos parcelas en rangos de medio a alto, y los demás suelos se categorizaron en niveles bajos. Dadas las insuficiencias de los principales elementos químicos para el desarrollo del cultivo de naranja Valencia, hay que mencionar que los elementos Ca, Mg, P, N, y K son limitantes en la producción y en la calidad de los frutos, por ser suelos de baja fertilidad natural (Orduz y Baquero, 2008).

En cuanto a los suelos donde se desarrollará el modelo 3 (Leucaena/Plátano/Maíz), el 100% de las parcelas agroecológicas, según las pruebas para Na, P, N-NO₃, S y Cu, se categorizaron como deficientes. Así mismo, el 80% de las parcelas presentaron deficiencias para los elementos químicos Mg, Mn y B (Tabla 5). En las parcelas testigos, donde se cultivará plátano, se encontró que los suelos presentaron deficiencias para los mismos elementos químicos de las parcelas agroecológicas, con igual similitud porcentual.

Tabla 5. Porcentaje de niveles bajos y deficientes de los elementos y propiedades químicas de los suelos del modelo 3.

Nutrientes															
Parcelas (%)	Niveles	K	Ca	Mg	Al	Na	P	N-NH ₄	N-NO ₃	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Agroecológicas	Bajo	40	20	20	20	0	0	0	0	0	20	0	0	0	20
	Deficiente	60	60	80	0	100	100	0	100	100	60	80	100	0	80
Testigos	Bajo	40	20	20	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	20
	Deficiente	60	60	80	0	100	100	0	100	100	40	60	100	0	80
Propiedades Químicas				pH	C.E					C.I.C					
Agroecológicas	Bajo	80			0					0					
	Deficiente	20			100					0					
Testigos	Bajo	80			0					0					
	Deficiente	20			100					0					

K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; P: fósforo; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; C. E: conductividad eléctrica; C. I. C.: capacidad de intercambio catiónico

Fuente: autores.

En consecuencia, la corrección de las deficiencias de Ca, Mg y P en los suelos dedicados a la agricultura se debe realizar antes del establecimiento de los cultivos, mediante la aplicación de enmiendas orgánicas y calcáreas, dado a que son nutrientes vitales para el crecimiento de las raíces y la constitución del tejido celular. Además, el Ca es un nutriente que se fija luego de su uso, por ende, inmóvil dentro de la planta, lo que indica que los futuros cultivos pueden mostrar sintomatología en las hojas más nuevas de las plantas (Ramos, 2011).

Otros elementos por considerar, para la implementación de los cultivos que integrarán los tres modelos agroecológicos, es la deficiencia del azufre, debido a que

este elemento es un agente activo en la formación de clorofila y la síntesis de aminoácidos y vitaminas. Se considera que el azufre es esencial para desarrollo de las plantas, ya que participa en múltiples procesos; así mismo, se considera que la deficiencia del azufre afecta el rendimiento y la calidad de las cosechas dado que se interrumpe la síntesis de proteínas. Castro y Hugo, (1998), por lo tanto, argumentan que la deficiencia de azufre se debe minimizar mediante los planes de fertilización, ya que la respuesta de los cultivos a los elementos NPK puede limitarse. En general, en los suelos donde se implementarán los tres modelos agroecológicos con sus respectivas parcelas testigos, se evidenció que el Al y el Zn presentaron mayores concentraciones,



caracterizándose en niveles medios y altos. Así mismo, los suelos para la variable C. I. C se caracterizaron dentro del rango óptimo. Por otro lado, el pH demostró la misma condición en todos los suelos de las 15 fincas, catalogándose dentro de los rangos bajos y deficientes.

Respecto a la acidez, de acuerdo con las condiciones de acidez que presentaron los suelos de este municipio se recomienda realizar labores de encalado, dados los beneficios que brindan principalmente para el desarrollo de los cultivos. El mayor efecto del encalado en los suelos de tendencia ácida es la reducción de la solubilidad del aluminio que, aún en bajas concentraciones, es tóxico para la mayoría de los cultivos (Espinosa y Molina, 1999); de igual modo, el encalado ayuda a suplir las deficiencias de calcio. Por ende, el encalamiento de los suelos debe tenerse en cuenta, ya que los suelos de la región son de tendencia extremadamente ácida. La acidez de los suelos está estrechamente relacionada con las condiciones climáticas, dado que en este municipio son frecuentes las fuertes lluvias. Sin embargo, se deben contemplar otros aspectos, ya que la acidez no solo depende de la precipitación, sino también de la temperatura que acelera los procesos de descarbonatación, la intervención antropogénica y su origen natural. Por otra parte, un suelo ácido también está asociado

con una inadecuada estructura que causa limitaciones en la circulación del aire y agua (Yáñez, 1989).

Para el caso de la C. E., los suelos de las parcelas agroecológicas y las testigos se categorizaron dentro del rango deficiente para las 15 fincas, registrando valores entre 0,5 y 1 mS/cm, lo cual no es una limitante para la implementación de los modelos agroecológicos; pues, según la clasificación de los suelos con base en su C.Ee y el efecto general sobre los cultivos, se esquematiza que los suelos con C.Ee inferior a 1 dS/m, son libres de sales (Castellanos et al., 2000). Es decir, no existe restricción para ningún tipo de cultivo, ya que esta variable no condiciona directamente el desarrollo de las plantas.

Por otra parte, los macroelementos, en su mayoría, presentaron una variabilidad espacial muy alta, reflejando una gran diferencia entre los valores mínimos y los máximos. Esto se confirmó mediante la obtención de los altos coeficientes de variación (CV), excepto para los macroelementos N-NH₄, S y la variable de C. I. C. El CV más alto se observó para el Ca (126,56 %), seguido del Mg (117,23 %). Esta variabilidad puede inferirse de condiciones inherentes del suelo, resultante de las interacciones que se dan en los procesos de su formación (Tabla 6).

Tabla 6. Resultado del análisis descriptivo de los Macroelementos.

Estadísticos Descriptivos	N-NH ₄	N-NO ₃	P (ppm)	S	Mg	K (meq/100 cc)	Ca	C. I. C. (meq/100 g)
Media	19,66	7,83	4,06	1,16	0,44	0,10	1,86	28,46
Mínimo	12	5	2	0	0,06	0,02	0,21	12,26
Máximo	24	20	12	2	1,83	0,38	8,39	37,00
SD	2,82	5,20	2,63	0,46	0,52	0,08	2,36	8,13
CV (%)	14,34	66,38	64,88	39,52	117,23	80,52	126,56	28,59

N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; P: fósforo; Mg: magnesio; S: azufre; K: potasio; Ca: calcio; C. I. C.: capacidad de intercambio catiónico; **SD**: Desviación Estándar; **CV**: Coeficiente de Variación.

Fuente: autores.

Respecto al N-NH₄, según la agrupación de los coeficientes de variación citados por Larreal et al., (2009), este demostró una variabilidad muy baja, dado que el CV se encontró dentro del rango de 0 a 15 %,

representando así una alta homogeneidad. Por ello, cabe resaltar que el N-NH₄ participa activamente en la dinámica del nitrógeno en el suelo, convirtiéndose en un elemento esencial y primario para la vida vegetativa

de las plantas (Preston, 1982; Marzadori et al., 1995; Feigenbaum et al., 1994). Una tendencia similar se observó en el análisis de los microelementos de los suelos, en el que se reflejó la incidencia de valores altos de CV que sobrepasaron el 60%, indicando

variabilidades muy altas según las referencias mencionados anteriormente, excepto para el Cl, Zn y Cu. Los microelementos con mayores rangos de CV fueron el Mn con un valor de 159,81%, seguido por el boro con el 75,25% (Tabla 7).

Tabla 7. Resultado del análisis descriptivo de los Microelementos

Estadísticos Descriptivos	Na (meq/L)	Al (meq/100 cc)	Zn	B	Fe (ppm)	Mn	Cu	Cl (meq/100L)
Media	0,06	2,8	4,31	0,18	189,83	40,3	0,12	28,46
Mínimo	0,01	0,1	2,9	0,05	51	2	0,1	12,26
Máximo	0,23	5,9	8,6	0,51	600	323	0,2	37
SD	0,04	1,68	1,36	0,13	130,83	63,19	0,043	8,13
CV (%)	60,53	60,22	31,51	75,25	68,92	156,81	34,89	28,59

Na: sodio; Al: aluminio; Zn: zinc; B: boro; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Cl: cloro; **SD**: Desviación Estándar; **CV**: Coeficiente de Variación.

Fuente: autores.

Dada la variabilidad entre sitios de muestreo muy alta para Mn y B, se apreció que existe una heterogeneidad en cuanto a sus contenidos en los suelos. Por lo tanto, es necesario darle manejo a esta situación con las alternativas que ofrece la agroecología para la incorporación de estos a los suelos, dado que hacen parte de los principales microelementos que necesitan las plantas para su crecimiento y los procesos de división celular.

3.2 Comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre parcelas

No existieron diferencias significativas entre los macroelementos de parcelas agroecológicas y testigos en las 15 fincas evaluadas ($p > 0,05$). Por otro lado, los macroelementos reflejaron mayor rango de medida en las parcelas testigos, con excepción del P y el S (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación de medias de los contenidos de macroelementos entre las parcelas.

Parcela	K	Ca ^a (meq/100 cc)	Mg ^a	P	N-NH ₄ (ppm)	N-NO ₃	S
Agroecológica	0,09	1,86	0,42	4,13	18,73	7,00	1,20
Testigo	0,11	1,88	0,47	4,00	20,60	8,67	1,13
Valor P	0,99ns	0,92ns	0,99ns	0,18ns	0,99ns	0,92ns	1,00ns

K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; P: fósforo; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre. ns. No significación estadística por la prueba T de Student o Kolmogorov-Smirnov para $p \leq 0,05$. ^a Las variables procesadas por la prueba Kolmogorov-Smirnov.

Fuente: Autores.

Con relación al N-NH₄ y el N-NO₃, a pesar de que no presentaron diferencia estadística, los resultados demostraron que, para los suelos donde se implementarán las parcelas testigos, existe una tendencia de mayores concentraciones, siendo el N-NO₃ la principal forma de absorción del nitrógeno para las plantas de los futuros cultivos. Igualmente, la

comparación de medias de las concentraciones de los microelementos, entre las dos parcelas, evidenció que tampoco existen diferencias estadísticas según la prueba T de Student (Tabla 9). Es decir, las variables presentaron particularidades de heterogeneidad, indicando que son temporales e inestables con relación a su disponibilidad.



Tabla 9. Comparación de medias de los contenidos de microelementos y la C. I. C. entre las parcelas.

Parcela	Na ^a (meq/L)	Cl (meq/100L)	Fe	Mn ^a Ppm	Cu ^a	Zn (meq/100cc)	B	Al	C. I. C. (meq/100g)
Agroecológica	0,06	0,49	180,07	23,33	0,13	4,29	0,20	2,75	29,17
Testigo	0,07	0,46	199,60	57,27	0,11	4,34	0,17	2,85	27,77
Valor P	0,92ns	0,92ns	0,92ns	0,66ns	0,92ns	0,99ns	0,92ns	0,88ns	0,92ns

Na: sodio; Cl: cloro; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; Al: aluminio; C.I.C: capacidad de intercambio catiónico. ns. No significación estadística por la prueba T de Student o Kolmogorov-Smirnov para $p \leq 0,05$. ^a Las variables procesadas por la prueba Kolmogorov-Smirnov.

Fuente: Autores.

De manera específica, es importante destacar los resultados obtenidos para los promedios del Al (2,75meq/100cc) en los suelos de las parcelas agroecológicas y para los suelos de las parcelas testigos (2,85meq/100cc). Estos últimos reflejaron altos contenidos respecto a los datos de referencia. Sobre el aluminio es necesario explicar que es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre y generalmente no se encuentra disponible para participar en reacciones biogeoquímicas, por ende, ocasiona toxicidad y reacciones negativas con otros elementos primarios (Driscoll y Schecher, 1990). Aunque también puede estar presente en otras formas no fitotóxicas, como los aluminosilicatos que se encuentran mezclados con metales como sodio, potasio, hierro, calcio o magnesio (Von Uexküll y Mutert, 1995; Baligar y Fageria,

1997). No obstante, en suelos ácidos (pH 5.5 - 4.5, o <4.5) los iones aluminio se solubilizan y pueden penetrar en células radicales, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales como fósforo y calcio (Kochian et al. 2005). Por lo anterior, es recomendable generar medidas correctivas para la disminución de este elemento.

Con relación a otras variables, en la Tabla 10 se muestran las comparaciones de medias para variables agroquímicas como pH, C. E., arena, limo, arcilla, M. O., Da y saturación de bases en los suelos en los cuales se implementarán los dos tipos de parcelas. En el análisis se pudo notar que no existe significancia estadística, según la prueba de Student.

Tabla 10. Comparación de medias de las variables agroquímicas entre las parcelas.

Parcela	pH	C.E ^a m.S/cm	Arena	Limo	Arcilla %	M.O.	Sat. Bases	Da g/cc
Agroecológica	4,67	0,09	19,13	54,80	26,07	3,43	1,03	4,67
Testigo	4,66	0,08	15,13	56,00	26,47	3,29	1,03	4,66
Valor P	0,96ns	0,375ns	0,92ns	0,83ns	0,94ns	0,37ns	0,66ns	0,95ns

pH: reacción del suelo; C.E: conductividad eléctrica; M.O: materia orgánica; Sat. Bases: saturación de bases; Da: densidad aparente. ns. No significación estadística por la prueba T de Student o Kolmogorov-Smirnov para $p \leq 0,05$. ^a las variables procesadas por la prueba Kolmogorov-Smirnov.

Fuente: Autores.

Las parcelas agroecológicas y las parcelas testigos presentaron suelos arcillosos-limosos, con rica cantidad de materia orgánica, pero con una baja saturación de bases. Por último, son suelos compactados, es decir, con mayor densidad aparente,

lo cual puede limitar el crecimiento de las raíces de los cultivos. Por ello, es necesario la implementación de buenas prácticas agrícolas enfocadas al manejo de los suelos, ya que en algunos casos la compactación de los suelos obedece al tipo de labranza.

3.3 Comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre los modelos agroecológicos.

Los análisis de varianza (ANOVA) para las concentraciones de los macroelementos

evidenciaron la existencia de diferencia estadística significativa solo para la concentración de P, con mayor nivel para el modelo 2 y menor para el 3, no difiriendo el modelo 1 de estos dos (Tabla 11).

Tabla 11. ANOVA para los macroelementos de los suelos con respecto a los modelos agroecológicos.

Modelo	K	Ca (meq/100cc)	Mg	P	S	N-NH ₄ (ppm)	N-NO ₃
1	0,09a	1,99a	0,55a	3,60ab	1,30a	21,10a	8,50a
2	0,07a	0,82a	0,25a	5,70a	1,20a	19,20a	9,00a
3	0,13a	2,78a	0,53a	2,90b	1,00a	18,70a	6,00a
CV (%)	76,44	123,05	116,89	59,75	39,38	13,79	66,49
EE*	0,02	0,73	0,16	0,77	0,14	0,86	1,65

K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; P: fósforo; S: azufre; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; **CV**: Coeficiente de Variación; **EE***: Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para P<0,05 según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

Al comparar los microelementos de los suelos en los tres modelos agroecológicos, se encontró que solo para la variable C. I. C. era mayor para el modelo 3, con diferencia estadística significativa con los otros dos modelos. No se observó diferencia para el resto de las variables, sin embargo, se debe

destacar que el Fe en el modelo 3 es muy bajo (122,90 PPM), lo cual podría interferir en el desarrollo radicular de las plantas y en la falta de absorción de otros macroelementos y microelementos esenciales para el desarrollo vegetativo de los futuros cultivos de este modelo (Tabla 12).

Tabla 12. ANOVA para los microelementos de los suelos con respecto a los modelos agroecológicos.

Modelo	Al (meq/100cc)	Na	Cl- (meq/L)	Fe	Mn	Cu (ppm)	Zn	B	C.I.C (meq/100g)
1	2,82a	0,08a	0,45a	228,50a	27,20a	0,11a	4,67a	0,20a	31,99a
2	3,33a	0,07a	0,53a	218,10a	43,70a	0,14a	4,34a	0,17a	34,10a
3	2,25a	0,04a	0,44a	122,90a	50,00a	0,12a	3,94a	0,17a	19,30b
CV(%)	60,15	67,42	23,89	66,38	160,56	34,54	31,84	77,72	17,09
EE*	0,53	0,01	0,03	39,8	20,4	0,01	0,43	0,04	1,54

Na: sodio; Cl: cloro; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; Al: aluminio; C.I.C: capacidad de intercambio catiónico; **CV**: Coeficiente de Variación; **EE***: Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para P<0,05 según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 13, se observaron diferencias estadísticas entre los elementos agroquímicos

para pH, limo, M. O., Da y saturación de bases entre los modelos agroecológicos.



Tabla 13. ANOVA para las variables agroquímicas de los suelos con respecto a los modelos agroecológicos.

Modelo	pH	C.E m.S/cm	Arena	Limo %	Arcilla	M.O.	Sat. Bases	Da g/cc
1	4,68ab	0,07a	15,10a	57,70a	27,20a	3,26ab	8,14ab	1,01ab
2	4,49b	0,10a	11,40a	65,30a	19,70a	4,01a	3,35b	0,95b
3	4,82a	0,07a	24,90a	43,20b	31,90a	2,81b	20,29a	1,11a
CV (%)	5,25	52,48	110,87	23,10	53,18	29,81	133,53	13,05
EE*	0,08	0,01	6,00	4,04	4,42	0,31	4,47	0,04

CV: Coeficiente de Variación; **EE*:** Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para $P < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

Los suelos que integrarán el modelo 2 presentaron los valores más bajos de pH (4,49), difiriendo con los suelos del modelo 3 (4,82), más no con los del modelo 1 (4,68). Este mismo comportamiento se presentó para las variables saturación de bases y densidad aparente; mientras que, los porcentajes de materia orgánica fueron mayores en los suelos del modelo 2, sin presentar diferencias con los suelos del modelo 1, pero si con los suelos del modelo 3. Los contenidos de materia orgánica están directamente relacionados con los porcentajes de arena, debido a que entre mayor sea el porcentaje de arena en un suelo, menor será el contenido de materia orgánica. Consecuentemente, los porcentajes de limo fueron menores en los suelos del modelo 3 con respecto a los encontrados en los suelos del modelo 1 y 2.

El pH es una de las variables más importantes en los suelos de uso agrícola, pues afecta directamente la absorción de los nutrientes del suelo por las plantas. Esto

podría presentarse en los suelos en estudio, debido a que estos fueron de carácter ácido y este rango de pH no es apropiado para el desarrollo de los cultivos. Por esta razón, se deben implementar estrategias de manejo para corregir esta característica, teniendo en cuenta que el pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003).

3.4 Comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre las fincas de cada modelo.

En la tabla 14 se muestran los parámetros fisicoquímicos que presentaron diferencias significativas entre los suelos de las cinco fincas que conformarán el modelo 1, como fue el caso del K, Ca, Al, Fe, porcentaje de limo, arcilla y Saturación de Bases. Así mismo, la C. I. C y el pH.

Tabla 14. Comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre las fincas del modelo 1.

Finca	K	Ca (meq/100g)	Al	Fe (ppm)	Limo	Arcilla %	Sat. Bases	C.I.C (meq/100g)	pH
1	0,02b	0,38b	4,10a	124,00b	49,50ab	45,50a	1,86b	33,00a	4,54b
2	0,05ab	0,43b	3,50a	191,50b	51,50ab	27,00ab	2,06b	33,50a	4,70ab
3	0,16a	2,36b	2,05ab	155,50b	61,00ab	28,50ab	11,17ab	32,50a	4,61ab
4	0,15a	5,94a	0,40b	150,00b	46,50b	26,00ab	21,70a	33,50a	5,01a
5	0,09ab	0,85b	4,05a	521,50a	80,00a	9,00b	3,94b	27,47b	4,52b
CV (%)	32,94	36,66	18,83	26,49	14,45	30,98	42,84	11,34	2,24
EE*	0,02	0,52	0,37	42,80	5,89	5,96	2,46	2,56	0,07

Finca 1: Tierra Grata; Finca 2: El Porvenir I; Finca 3: Vista Hermosa; Finca 4: El Paraíso; Finca 5: El Convento; K: potasio; Ca: calcio; Al: aluminio; Fe: hierro; Sat. Bases: saturación de bases; C.I.C: capacidad de intercambio catiónico; pH: reacción del suelo; **CV:** Coeficiente de Variación; **EE*:** Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para $P < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

Para el modelo 1, se presentaron las mayores concentraciones de K en los suelos de la finca Vista Hermosa y El Paraíso, sin evidenciar diferencia estadística con las fincas El Porvenir y El Convento, pero sí con la finca Tierra Grata. El contenido de Ca resultó mayor en el suelo de la finca El Paraíso, con diferencias significativas con el resto de las fincas. Respecto al aluminio, la mayor concentración de Al se encontró en el suelo de las fincas Tierra Grata (4,10 meq/100cc), El Convento (4,05 meq/100cc) y El Porvenir I (3,50 meq/100cc), con diferencia estadística solo con la finca El Paraíso. En cuanto al contenido de Fe, el suelo de la finca El Convento presentó el valor más alto, evidenciando diferencia estadística con las demás fincas.

La variable porcentaje de limo presentó el contenido más alto en la finca El Convento (80,00%), presentando una diferencia estadística con los suelos de la finca El Paraíso (46,50%), que a su vez fue el de menor porcentaje; las otras fincas presentaron valores intermedios sin diferencia con esta.

El contenido de arcilla fue mayor para la finca Tierra Grata (45,50 %), difiriendo con la finca El Convento y no con el resto. Por otro lado, el porcentaje de saturación de bases fue mayor en los suelos de la finca El Paraíso, el cual no difirió del registro de la finca Vista Hermosa, pero sí con los valores de las demás fincas, siendo estos los registros más bajos.

El valor de la C. I. C. resultó más bajo en la finca El Convento, la cual presentó diferencia con el resto de las fincas. Así mismo, se identificó que el suelo de la finca El Paraíso presentó el pH relativamente más alto (5,01), mostrando diferencia estadística con las fincas Tierra Grata (4,54) y El Convento (4,52). Este último fue el pH más bajo entre las fincas evaluadas del modelo 1, mientras que las demás fincas mostraron valores intermedios. En cuanto a los suelos de las fincas que integrarán el modelo 2, se evidenció diferencia estadística para la concentración de K, Mg, Al y Zn. De igual manera, para el porcentaje de M. O. y las variables Da, C. I. C. y C. E. (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados de la comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre las fincas del modelo 2.

Finca	K	Mg (meq/100cc)	Al	Zn (ppm)	M. O. %	Da g/cc	C. I. C. meq/100g	C. E. m.S/cm
1	0,06b	0,22b	3,60ab	5,25a	3,62b	1,11a	33,50b	0,15ab
2	0,16a	0,57a	4,85a	5,40a	6,22a	0,84b	36,50a	0,19a
3	0,04b	0,12b	2,10c	3,40b	3,25b	1,00ab	33,50b	0,06bc
4	0,03b	0,09b	2,35bc	3,70b	4,34ab	0,95ab	34,50ab	0,05c
5	0,07b	0,24b	3,75ab	3,95b	2,63b	0,88b	32,50b	0,06bc
CV (%)	104,67	107,33	47,64	30,03	48,69	15,11	6,28	86,00
EE*	0,05	0,18	1,12	0,92	1,38	0,10	1,51	0,06

Finca 1: El Dorado; Finca 2: Gualandayes; Finca 3: Cachipay; Finca 4: La Argentina; Finca 5: Los Cafeteros; K: potasio; Mg: magnesio; Al: aluminio; Zn: zinc; M. O.: materia orgánica; Da: densidad aparente; C. I. C.: capacidad de intercambio catiónico; C. E.: conductividad eléctrica; **CV**: Coeficiente de Variación; **EE***: Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para $P < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

En el modelo 2, se presentaron las mayores concentraciones de K (0,16 meq/100 cc) y Mg (0,57 meq/100 cc) en el suelo de la finca Gualandayes, evidenciando diferencia estadística con el resto de las fincas. Igualmente, el contenido de Al resultó mayor en el suelo de la finca Gualandayes (4,85 meq/100 cc), sin diferencia estadística con los suelos de las fincas El Dorado y

Los Cafeteros, pero sí con las fincas La Argentina y Cachipay. En cuanto al Zn, la mayor concentración la reflejó las fincas Gualandayes y El Dorado que difirieron con las otras fincas. De igual manera, el contenido de M. O. fue mayor en el suelo de la finca Gualandayes, sin diferencia estadística con la finca La Argentina, pero sí con el resto de las fincas. Solo Gualandayes superó el contenido



de 5%. Por otra parte, el valor más alto de la Da se presentó en el suelo de la finca El Dorado, presentando diferencia estadística con las fincas Gualandayes y Los Cafeteros y no con el resto.

Al igual que en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos, la finca Gualandayes presentó el valor más alto de C. I. C., difiriendo con las demás fincas, excepto con la finca La Argentina. Así mismo, la C. E. fue mayor para el suelo de esta finca, sin diferencia

estadística con la finca El Dorado, pero sí con el resto de las fincas, donde además se evidenciaron valores muy bajos como fue el caso de la finca La Argentina (0,05 m. S/cm). El análisis de varianza para los suelos de las fincas del modelo 3, demostró también diferencia estadística significativa para todas las variables (concentración de los elementos K, Ca, Mg, Al y N-NH₄, el contenido de arcilla, la Saturación de Bases, la C. I. C. y el pH) (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados de la comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos entre las fincas del modelo 3.

Finca	K	Ca (meq/100cc)	Mg	Al	N-NH ₄ (ppm)	Arcilla %	Sat. Bases	C.I.C meq/100g	pH
1	0,05b	0,33c	0,07c	1,75ab	20,00ab	36,50ab	2,86c	17,39b	4,52c
2	0,29a	8,08a	1,82a	0,20b	17,50bc	20,00ab	57,35a	17,83b	5,19a
3	0,05b	0,54c	0,15bc	3,30ab	22,50a	42,50a	2,26c	33,00a	4,74bc
4	0,21ab	4,42b	0,45b	0,50b	15,00c	12,00b	32,55b	15,98b	5,09ab
5	0,06b	0,55c	0,18bc	5,50a	18,50abc	48,50a	6,46c	12,32b	4,55c
CV (%)	117,99	173,49	194,07	137,63	21,15	68,20	168,66	58,28	9,03
EE*	0,11	3,41	0,73	2,18	2,79	15,38	27,74	7,95	0,30

Finca 1: Porvenir II; Finca 2: La Vega I; Finca 3: La Vega II; Finca 4: El salvador; Finca 5: Santa Cecilia; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Al: aluminio; N-NH₄: nitrógeno disponible como amonio; Sat. Bases: saturación de bases; C.I.C: capacidad de intercambio catiónico; pH: reacción del suelo; **CV**: Coeficiente de Variación; **EE***: Error Estándar del Error Experimental para la comparación múltiple de medias de la prueba de Tukey. Valores de las medias con letras desiguales en las columnas de cada variable difieren para P<0,05 según prueba de Tukey.

Fuente: Autores.

Las mayores concentraciones de K en el modelo 3 se verificaron en las fincas La Vega I y El Salvador, que se diferenciaron de las fincas Porvenir II, La Vega II y Santa Cecilia. El contenido de Ca resultó mayor en el suelo de la finca La Vega I presentando diferencias significativas con todas las fincas, para este elemento la finca Porvenir presentó solo 0,33 meq/100 cc.

El valor más alto de Mg se reflejó en la finca La Vega I (1,82 meq/100 cc), difiriendo con las demás fincas; a su vez, la menor concentración se evidenció en la finca Porvenir II (0,07 meq/100 cc.). La mayor concentración de Al se encontró en el suelo de la finca Santa Cecilia (5,50 meq/100 cc.), reflejando diferencia estadística con las fincas La Vega I y El Salvador, y no con las otras dos. En cuanto al contenido de N-NH₄, el suelo de la finca La Vega II presentó el valor más alto, sin diferir con las fincas Porvenir II y Santa Cecilia, pero sí con las demás fincas.

El contenido de arcilla fue mayor para las fincas Santa Cecilia (48,50 %) y la Vega II (42,50 %) que difirieron únicamente con la finca El Salvador. Por otro lado, el mayor porcentaje de saturación de bases se evidenció en el suelo de la finca La Vega I (57,35 %), difiriendo con los valores de las demás fincas. El valor relativo más bajo de saturación de bases se encontró en la finca La Vega II (2,26%). En cuanto a la C. I. C., su valor resultó más alto en los suelos de la finca La Vega II (33,00), difiriendo con las cuatro fincas restantes, las cuales presentaron registros relativamente bajos. Así mismo, se encontró que el suelo de la finca La Vega I presentó el pH más alto (5,19) mostrando diferencia estadística con el resto de las fincas, excepto con la finca El Salvador.

La existencia de diferencias estadísticas entre los suelos de las fincas que integrarán cada modelo agroecológico resulta preocupante, ya que podría derivar un

crecimiento y desarrollo no uniforme de los cultivos de un mismo modelo, especialmente por las diferencias evidenciadas en los niveles de los principales macroelementos como K, Ca, Mg y algunos microelementos como el Fe y Zn, además de las variables C. I. C. y pH. Estas diferencias deben tenerse en cuenta en el manejo de las enmiendas y fertilizantes que pueden emplearse para suplir las necesidades de estos elementos y para la mejora de las condiciones fisicoquímicas del suelo.

La variable C. I. C. presentó diferencias significativas entre los suelos de las fincas de los tres modelos, por lo que debe mantenerse una observancia sobre la futura influencia de la C. I. C. en el desarrollo de los cultivos, debido a que esta se asocia con la textura, el porcentaje de arcilla y el contenido de materia orgánica del suelo (Stevenson y Cole, 1999). En el municipio de Santa María, los suelos presentaron tendencia a manejar valores muy variantes para la C. I. C., como se muestra en los resultados obtenidos, en los que se evidencia que el valor mínimo es significativamente bajo (12,32meq/100g), en comparación al registro máximo (36, 50meq/100g). En cuanto al porcentaje de saturación de bases, los suelos de las fincas Tierra Grata, El Porvenir I y El Convento del modelo 1, y las fincas Porvenir II, La Vega II y

Santa Cecilia del modelo 3 presentaron valores muy bajos, inferiores a 6,5%, reflejando pocas posibilidades para retener cationes, lo cual se debe corregir para evitar dificultades en la nutrición de los futuros cultivos.

Los valores más bajos del pH se obtuvieron en las fincas Tierra Grata y El Convento del modelo 1, al igual que en las fincas Porvenir II y Santa Cecilia; por esto se debe tener cuidado con los cultivos, ya que los pH muy bajos pueden limitar la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Loué, 1988).

Los suelos de las fincas donde se implementarán los tres modelos presentaron altos contenidos de Al. Esto se comprobó en los suelos de las fincas Tierra Grata, El Convento y El Porvenir I del modelo 1, las fincas El Dorado, Los Cafeteros y Gualandayes del modelo 2 y las fincas Santa Cecilia y La Vega II del modelo 3. Según Espinosa y Molina (1999), esta condición podría llegar a ser tóxica para la mayoría de los cultivos, por esta razón es importante la disminución de los niveles de Al y la aplicación de mulch, materia orgánica y abonos verdes, los cuales tienen una gran efectividad en la reducción de los efectos tóxicos del aluminio en suelos ácidos (Casierra y Aguilar, 2007).

CONCLUSIONES

Las fincas beneficiarias del proyecto Boyacá Agro, en el municipio de Santa María, mostraron porcentajes bajos o deficientes en los niveles de macroelementos N-NO₃, P, K, Ca, Mg y S; además, un alto porcentaje de los suelos presentaron un pH ácido y deficiencia en la conductividad eléctrica. Estas condiciones son compartidas para los suelos destinados a los tres modelos agroecológicos, tanto en las parcelas agroecológicas como en las testigos. Por otra parte, se evidenció exceso del aluminio, lo cual puede implicar toxicidad y afectación en el sistema radicular de las futuras plantas.

En general, los suelos del estudio presentaron una alta variabilidad espacial para los macroelementos, excepto para N-NH₄, S y la C. I. C.; así como para la mayoría de los microelementos, menos el Zn, Cu y el Cl. Estas

condiciones pueden repercutir en el desarrollo desigual de los cultivos sobre todo para los que se siembren en las fincas que pertenecen a un mismo modelo. A su vez, el análisis de varianza entre los parámetros fisicoquímicos de los suelos, permitió identificar que el P se encuentra en concentraciones superiores en los suelos donde se sembrará el modelo 2. Este elemento presentó diferencias significativas respecto a los suelos donde se establecerá el modelo 3 y no en los suelos donde se desarrollará el modelo 1. Así mismo, la C. I. C. fue mayor para los modelos 1 y 2, con diferencias estadísticas significativas con el modelo 3.

Las fincas de cada modelo evidenciaron diferencias estadísticas para los elementos agroquímicos K, Ca, Mg, Fe, N-NH₄, Al y Zn,



y la C. I. C. Resulta preocupante la existencia de una diferencia estadística significativa para todas estas variables, entre los suelos de fincas que pertenecerán a un mismo modelo agroecológico. De igual forma, el análisis de suelos mostró una diferencia estadística

significativa entre estos, al evaluar las propiedades físicas C. E., pH, contenido de limo y arcilla, saturación de bases, densidad aparente y M. O., difiriendo este último parámetro entre las fincas que participarán en el modelo 2. 

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Belcy Hernández Tabaco: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura - borrador original, revisión y edición.

Leónidas Castellanos González: investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura - revisión y supervisión.

AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer un reconocimiento especial a la Gobernación del departamento de Boyacá y a la Universidad de Pamplona quienes, en aras de dar cumplimiento al objeto del proyecto "Desarrollo estratégico agroecológico para el fortalecimiento del sector productivo en el Departamento de Boyacá", realizaron la toma de muestras de suelo en las 15 fincas del municipio de Santa María para el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

Arteaga, J., Navia, J. y Castillo, J. (2016). Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62-75. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>

Baligar, V. C. & Fageria, N. C. (1997). Nutrient use efficiency in acid soils: Nutrient management and plant use efficiency. En A. C. Moniz, A. M. C. Furlani, N. K. R. E. Schaffert, Fageria, C. A. Rosolem y H. Cantarella (Eds.), *Plant-Soil Interactions at Low pH: Sustainable Agriculture and Forestry Production* (pp. 75-93). Brazilian Society of Soil Science.

Benton, J. (2003). *Agronomic handbook: Management of crops, soils, and their fertility*. CRC PRESS.

Castellanos, J. Z., Uvalle, J. X. y Aguilar, A. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.

Castro, H. (1998). *Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas*. ProduMedios.

Casierra-Posada, F. y Aguilar-Avenidaño, O. E. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257. <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>

Driscoll, C. T. & Schecher, W. D. (1990). The chemistry of aluminum in the environment. *Environmental Geochemistry and Health* 12(2), 28-49. <https://doi.org/10.1007/BF01734046>

Espinosa, J. y Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. *International Plant Nutrition Institute*. <http://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>

Feigenbaum, S., Hadas, A., Sofer, M. & Molina, J. A. E. (1994). Clay-fixed labeled ammonium as a source of available nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 980-985. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030049x>

Gee, G. & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: part I-Physical and mineralogical methods* (pp.1-1188). *Soil Science Society of America*. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>

International Business Machines Corporation. (16 april 2020). *SPSS Statistics for Windows, Version 21.0*. <https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-210-available-download>

Kochian, L. V., Piñeros, M. A. & Hoekenga, O. A. (2005). The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil*, 274, 175-195. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1158-7>

Larreal, M., Chirinos, I., Jiménez, L., Polo, V., Peters, W. y Noguera, N. (2009). Variabilidad de algunas de las propiedades físicas de un suelo para la definición de la serie "Los Cortijos", sector semiárido de la altiplanicie de Maracaibo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 925-936. <http://udoagricola.orgfree.com/V9N4UDOAg/V9N4Larreal925.htm>

Loué, A. (1988). *Los microelementos en agricultura*. Ed. Mundi-Prensa.

Lucas, R. & Knezek, B. (1972). Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plant. En J.J. Mortvedt (Ed.), *Micronutrients in agriculture* (pp. 1-666). Soil Science Society of America.

Martínez, R. (2004). Fundamentos culturales, sociales y económicos de la agroecología. *Revista de Ciencias Sociales*, 1-2(103-104), 93-102. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15310407>

Marzadori, C., Scudellari, D., Marangoni, A., Simoni, L., Antisari, L. V. & Gessa, C. (1995). Seasonal variation of interlayer ammonium in the soil of a peach orchard. *Acta Horticulturae*, 383, 35-46. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.383.4>

Orduz, J. y Baquero, J. (2008). Diagnostico nutricional de la naranja valencia (*C. sinensis*) y de la mandarina Arrayana (*C. reticulata*) en el piedemonte del Meta. En S. Caicedo, C. R. Salamanca, C. A. Jaramillo, E. F. Almansa, L. D. Peña (Eds.), *XIV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: Manejo del Suelo en la Mitigación del Cambio Climático*, (pp. 36-37). Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013). *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas*. <http://www.fao.org/3/a-i3361s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). *Estado Mundial del Suelo: Resumen Técnico*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>

Piaggese, A. (2004). *Los microelementos en la nutrición vegetal*. Valagro. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Losmicroelementosenlanutricionvegetal.pdf>

Preston, C. M. (1982). The availability of residual fertilizer nitrogen immobilized as clay-fixed ammonium and organic N. *Canadian Journal of Soil Science*, 62(3), 479-486. <https://doi.org/10.4141/cjss82-052>

Ramos, F. (2011). *Nutrición vegetal*. Universidad Autónoma de Aguascalientes. <https://es.scribd.com/document/387958688/nutricion-vegetal>

Stevenson, F. J. & Cole, M. A. (1999). *Cycles of Soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients* (2a ed.). Wiley.

Silva, S. M. y Correa, F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13-34. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1156/2435>

Toledo, V. M. (1990). Modernidad y Ecología. La nueva crisis planetaria. *Ecología Política*, 3, 9-22. https://www.ecologiapolitica.info/novaweb2/wp-content/uploads/2019/10/03_Toledo_1992.pdf

Von Uexküll, H. R. & Mutert, E. (1995). Global extend, development and economic impacts of acid soils. *Plant and Soil*, 171, 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>

Yáñez, J. (1989). Análisis de suelos y su interpretación. *Revista Horticultura*, 49, 75 - 89. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_1989_49_75_89.pdf

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.