

Zonificación por aptitud de suelo y diagnóstico de la fertilidad actual de la sabana de Bogotá para el cultivo de lechuga

Soil Aptitude Zoning and Current Fertility Diagnosis in the Bogotá Plateau for Lettuce Cultivation

Julio Ricardo Galindo-Pacheco^{1*} orcid.org/0000-0002-8240-6957

Diego Alejandro Salinas-Velandia¹ orcid.org/0000-0001-9108-6791

Martha Marina Bolaños-Benavides¹ orcid.org/0000-0003-4593-5523

Janet Amparo Español Aragón² orcid.org/0000-0003-0081-3637

¹Agrosavia, Km 14 vía Mosquera, Mosquera Colombia

²Investigadora independiente, Mosquera, Colombia,

* Autor para correspondencia: jgalindo@agrosavia.co

Resumen

Objetivo. contribuir a la zonificación del cultivo de lechuga y generar un diagnóstico actual de la fertilidad química de suelos. **Materiales y métodos.** Se realizó un muestreo de fertilidad química de suelos en 31 predios y se identificaron las clases y unidad cartográfica de suelos (UCS) correspondientes según la capacidad de uso agrícola. Con esta información, se realizó, una zonificación mediante el análisis espacial usando tres capas: municipios productores, UCS asociadas al cultivo y áreas con disponibilidad de agua. Posteriormente, se analizó estadísticamente si las clases y unidades de suelo contribuían a explicar las diferencias en los niveles de fertilidad química. Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales, para definir si existían factores contrastantes que facilitarían la identificación de problemas de fertilidad. **Resultados.** Se obtuvo un mapa de zonas aptas para el cultivo de lechuga. Se observaron concentraciones elevadas de nutrientes

Abstract

Objective. This work was to contribute to the zoning of lettuce cultivation in the Bogotá savannah and to generate a diagnostic of the current state of chemical fertility of the soils used. **Material and methods.** For this purpose, soil sampling was applied visiting 31 lettuce growers' farms. Samples were analyzed for chemical fertility and based on their location; the corresponding class was determined according to their capacity for agricultural use. Zoning was made by combining three map layers: municipalities, water access for agriculture and soil aptitude. Subsequently, it was statistically analyzed whether soil classes and units contributed to explain the differences in chemical fertility levels. Finally, principal component analysis was carried out defining whether there were contrasting factors that would facilitate the identification of fertility problems. **Results.** Reflected high nutrient concentration and imbalances between K/Mg and Ca/K ratios that

en el suelo y desbalances entre relaciones K/Mg y Ca/K que pueden afectar la disponibilidad de K. Se identificaron dos subclases de suelo asociadas al cultivo: IVhs y IIc; en la primera se presentó mayor conductividad eléctrica y menor concentración de potasio. Dos factores generaron condiciones contrastantes: la salinidad y el efecto de materia orgánica en la disponibilidad de algunos nutrientes. **Conclusión.** Existen 25 000 ha aptas para el cultivo de lechuga, que incluyen zonas con exceso de nutrientes y riesgo de salinización.

Palabras clave

Fertilización, rendimiento, nutrientes, relaciones catiónicas, productividad.

may affect K availability to plants. Two soil subclass were found: IVhs and IIc; the first with higher electrical conductivity and lower potassium concentration than the second. Two factors generated contrasting conditions: salinity and the effect of organic matter on the availability of some nutrients. There were no differences between soil units in crop yield (mean 52.8 t/ha). **Conclusion.** There are 25 000 ha apt to lettuce cultivation in Bogotá plateau, but some areas have nutrient excess and salinity risks.

Keywords

Fertilization, yield, nutrients, cation ratios, productivity.

Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es parte de las diez hortalizas más consumidas en el país, según lo señala la encuesta nacional de la situación nutricional (ENSIN, 2015), así como de las más cultivadas en Cundinamarca, principal departamento productor a nivel nacional, pues su participación en área sembrada en el país; entre 2007 y 2018, fue de 66.3%, seguido por Antioquia con 14.2% y Nariño con 12.7% (Agronet, 2021). La lechuga Batavia, como se conoce en Colombia (Iceberg es el nombre generalizado), es la de mayor consumo y representa 22.6% del área sembrada en hortalizas en la sabana de Bogotá, con predominancia en los municipios de Mosquera, Madrid y Tenjo, donde reportan rendimientos de 17.3, 13.5 y 20.0 t/ha, respectivamente (Agronet, 2021).

La competitividad y la intensificación sostenible de la agricultura son temas relevantes y necesarios por su relación positiva con el proceso de crecimiento y desarrollo económico (Salinas-Velandia *et al.*, 2022a), pero para transitar hacia estos objetivos se requieren superar algunas barreras y favorecer la circularidad de los recursos (Salinas-Velandia *et al.*, 2022 b). Uno de los problemas que se detectan en la producción de lechuga de la sabana de Bogotá es la baja eficiencia en el manejo de la fertilización, que impide lograr altos rendimientos y calidad en los productos (Quiñones *et al.*, 2019), a pesar de que los suelos utilizados tienen altas concentraciones de nutrientes (IGAC, 2020). Así, mientras que en Nariño el rendimiento promedio entre 2007 y 2018 fue de 25.7 t/ha, en el mismo periodo de tiempo en Cundinamarca fue de 15.6 t/ha (Agronet, 2021), lo cual reduce notablemente la rentabilidad y competitividad en este último departamento. Aunque la abundancia de nutrientes en el suelo no parece favorecer el desempeño del cultivo, la acumulación de algunos elementos en el tejido vegetal sí puede reducir la calidad nutricional de la cosecha (Zandvakili *et al.*, 2019).

Una problemática similar se presenta en la zona periurbana de la ciudad de Buenos Aires, donde, según Cuellas (2017), la sobrefertilización de cultivos hortícolas como la lechuga genera deterioro de los recursos naturales. Los excesos de nutrientes alteran negativamente las interacciones planta-microorganismo y deterioran la calidad del agua (Angulo *et al.*, 2020). En consecuencia, la polución por nutrientes en el suelo afecta el ingreso del agricultor, reduce el rendimiento de los cultivos, impide el desarrollo sostenible del suelo y afecta la salud humana. La ausencia de criterios técnicos hace que el uso de fertilizantes exceda el óptimo económico en un 30-60% en algunas provincias de China (Shen *et al.*, 2021).

En el cultivo de tomate, la práctica continuada de fertilización en exceso por largos periodos, hasta de 12 años, conlleva a una reducción en el rendimiento del cultivo en 38%, lo cual se asocia a cambios en el suelo, como son la reducción del pH, el aumento de la conductividad eléctrica, la mayor concentración de nutrientes y la reducción de la diversidad y riqueza bacteriana (Song *et al.*, 2022). Además, el exceso de algunos nutrientes por la aplicación desbalanceada de fertilizantes puede alterar la disponibilidad de otros. Por ejemplo, los iones de P se pueden precipitar por excesos de Ca, o pueden ser absorbidos por los óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Ruttemberg, 2014).

En Colombia, para 2015 se calculaba que 10% de la región andina tenía susceptibilidad a los problemas de salinización o sodización, y 2% del área ya tenía signos de ocurrencia de estos fenómenos. Los suelos de la sabana de Bogotá que se utilizan para la producción agrícola se estudian y clasifican por su capacidad de uso en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2020), con base en los efectos combinados del clima y de las características poco modificables de las geoformas y los suelos, siguiendo el mismo esquema utilizado desde 1997 por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2018, por sus siglas en inglés). Esta información sirve para asociar los tipos de suelo que son más favorables al cultivo de hortalizas, y en particular de lechuga, según la experiencia de los agricultores. Por ello es importante entender los criterios y la nomenclatura utilizada por el IGAC, según la cual se identifican clases agrológicas, subclases y grupos de manejo.

Las clases son grupos de suelos que presentan el mismo grado relativo de limitaciones y riesgos, se designan con números romanos de I a VIII, según el grado de restricciones, de modo que la clase I es el mejor suelo para uso agropecuario y la clase VIII tiene tantas y tan severas limitaciones que no permite ninguna actividad agropecuaria y se recomiendan la conservación natural y la recreación (IGAC, 2020).

Los limitantes a la producción agropecuaria que determinan las subclases son cinco y se designan con letras minúsculas que se agregan al número de la clase; éstas son: *p*, pendientes pronunciadas; *e*, erosión actual; *h*, exceso de humedad en el suelo por agua o encharcamientos e inundaciones; *s*, limitaciones en la zona radicular (incluye salinidad y capas endurecidas) y *c*, clima adverso. Las limitaciones que determinan las subclases pueden ser en algunos casos temporales, pero la mayoría son de carácter permanente, como las pendientes pronunciadas, la poca profundidad efectiva de los suelos o el clima desfavorable.

Los grupos de manejo son el nivel más detallado de la clasificación y se designan con números arábigos que acompañan el número de la clase y las letras que indican la subclase; así, una unidad de suelo con el mismo símbolo de subclase puede tener varios grupos de manejo, identificados cada uno con un número diferente e interpretando que posee las mismas limitantes para el uso, pero que las recomendaciones de manejo son diferentes (IGAC, 2020).

Finalmente, las unidades cartográficas de suelo (UCS) que agrupan varios suelos por pedología pueden ser homogéneos o heterogéneos en cuanto a sus clases taxonómicas y se identifican con un símbolo único. Cuando estas UCS se agrupan, porque tienen el mismo grado relativo de limitaciones y responden de forma similar a los mismos tratamientos, se denominan unidades de capacidad de uso (IGAC, 2020).

El objetivo de este estudio fue identificar las áreas aptas para el cultivo de lechuga en los principales municipios de la sabana de Bogotá, con base en las clases de suelo preferidas para el cultivo y las áreas cubiertas por las fuentes de agua para riego, y evaluar el estado actual de los niveles de fertilidad química de la zona resultante.

Materiales y métodos

Selección de municipios productores

Con base en las estadísticas agropecuarias de Cundinamarca, se seleccionó una lista de municipios cuya priorización se basó en la producción de lechuga. Los municipios fueron Mosquera, Funza, Madrid, Bojacá, Facatativá y Soacha. Estos municipios cubren 79.2% del área cultivada en lechuga (Gobernación de Cundinamarca, 2016).

Una vez seleccionados los municipios, se visitó cada uno y se procedió a determinar los medios de contacto, así como la aproximación con los agricultores-productores de lechuga. Entre los contactos utilizados estuvieron las autoridades municipales y los comercializadores de productos agrícolas (semillas). De esta manera, se creó una lista de agricultores a quienes se les visitó en su totalidad, para determinar si poseían un cultivo de lechuga en pie para realizar las evaluaciones respectivas.

Tamaño de muestra

Para seleccionar el tamaño de muestra se determinó que los agricultores medianos o grandes productores de lechuga de la sabana podían ser incluidos en la investigación. Con base en las estadísticas de producción en Cundinamarca, se calculó el coeficiente de variación del rendimiento del cultivo entre municipios, que resultó ser de 28.6%. Con este dato, se estimó una desviación estándar de la población de rendimientos de los cultivos de lechuga equivalente a 14.3 t/ha. Para obtener un margen de error de 5.0 t/ha en la estimación del rendimiento de los cultivos actuales, se calculó una muestra utilizando la siguiente fórmula (Yau, 2009):

$$n = \frac{z^2 s^2 N}{d^2 (N-1) + z^2 s^2}$$

Dónde:

N = número de productores en la zona seleccionada, según datos de la Gobernación de Cundinamarca (2016), para un total de 512.

z = valor correspondiente en la distribución normal estándar para un 95% de probabilidad ($=1.96$).

s = desviación estándar de la población, estimada en 14.3 t/ha.

d = margen de error en la estimación, asumido en 5.0 t/ha.

El resultado fue $=29.7$ que se aproximó a 30.

Selección de predios

La selección final de los predios se ajustó a la disponibilidad de agricultores en los municipios priorizados. Los requisitos de inclusión fueron: cultivo con máximo un mes de desarrollo en campo, agricultor interesado en suministrar la información requerida y zona de cultivo libre de problemas fitosanitarios o de baja disponibilidad de agua. Una vez seleccionados los predios, se georreferenciaron para ubicarlos según las clases de suelos definidas en los estudios previos del IGAC.

Análisis de suelo

En cada predio se seleccionó un área homogénea de 100 m² donde se realizaron los respectivos muestreos de suelo y cultivo para su análisis. Tal área debía estar en buenas condiciones de sanidad vegetal y sin riesgos mayores por problemas de drenaje del suelo o disponibilidad de agua o luz.

En cada área seleccionada se ubicaron cinco puntos al azar, y de cada uno se tomaron 200 g de suelo de los primeros 20 cm de profundidad del perfil, los cuales fueron transferidos y mezclados en un balde plástico, con la finalidad de obtener una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg de suelo. Cada muestra se rotuló y se llevó al laboratorio de química analítica de AGROSAVIA para su correspondiente análisis. El análisis de suelos a los sitios seleccionados se realizó por dos años consecutivos.

En el laboratorio se determinaron los siguientes parámetros: pH por el método potenciométrico; conductividad eléctrica con relación 1:5 suelo-agua y medición con potenciómetro; P disponible por Bray II y cuantificación por espectrofotometría (UV-VIS); cationes intercambiables (Ca, Na, Mg y K), extraídos en acetato de amonio 1N a pH 7 y cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica; microelementos (Fe, Mn, Cu, Zn disponibles) por Olsen modificado y cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica; materia orgánica por oxidación húmeda en dicromato de potasio, azufre y boro disponibles extraídos con fosfato monobásico de calcio.

Para la interpretación de los resultados de los análisis de fertilidad química de los suelos muestreados, se aplicaron en primer lugar los rangos óptimos de los nutrientes P y K, que indica el ICA; mientras que para complementar la interpretación, se recurrió a la información recopilada por Gómez (2011), especialmente en lo que se refiere a los rangos ideales recomendados para cada propiedad del suelo.

Evaluación del cultivo

En diez puntos de cada predio se realizó un muestreo aleatorio sobre el área de estudio para estimar el rendimiento del cultivo de lechuga. En cada punto se tomó un metro cuadrado de suelo sobre la cama y se cortaron las lechugas para obtener el peso fresco por planta con ayuda de una balanza electrónica Kern EMB 2000 0, con $d=1$ g, y con el resultado de los diez puntos se estimó el rendimiento promedio por hectárea.

Estudio de capacidad de suelos según el IGAC

Para esta investigación se partió del último estudio de aptitud de suelos para uso agropecuario que realizó el IGAC. De acuerdo con la ubicación georreferenciada de los puntos de muestreo de suelo aplicados en esta investigación, se determinó la clasificación de suelos correspondiente, utilizando los recursos de la página web del IGAC (2021). Para las propiedades químicas, se hizo la comparación entre las dos clases de suelo que aplicaron (II y IV) con una prueba *t* para muestras independientes, al nivel de significancia de 5%, con base en los resultados del análisis de fertilidad química y la clasificación del punto muestreado. De forma similar se procedió con las unidades cartográficas de suelo asociadas con las fincas de los productores de lechuga.

Fuentes de agua para riego

Se calculó el área de cubrimiento de las fuentes de agua utilizadas para el riego de los cultivos de lechuga, para lo cual se les aplicó una encuesta a los agricultores. Cuando la fuente se trató de un río, se calculó en el mapa la distancia al lote evaluado con herramientas de QGis (versión 3.22.0). Con la distancia promedio de todos los casos, más dos desviaciones estándar (con lo cual se cubre el 95% de la distribución normal), se construyó un área de buffer alrededor de cada río, para estimar el área potencial del cultivo de lechuga con acceso al agua. Para el caso del distrito de riego La Ramada, se consideró el área de cubrimiento de este en los municipios seleccionados, según el mapa de la CAR (2011).

Análisis estadístico

La descripción de variables y las pruebas estadísticas se realizaron con el programa Statistical Analysis System (SAS)® V9.4. La comparación entre clases de suelo se realizó con la prueba *t* al nivel de significancia $\alpha=0.05$. Las 14 variables analizadas respecto a las propiedades químicas del suelo se redujeron a dos con el análisis de componentes principales (ACP). Se evaluó la diferencia entre unidades de suelos en cuanto a los componentes principales y el rendimiento de los cultivos de lechuga utilizando la prueba *t* ($\alpha=0.05$).

Resultados

Identificación de zonas con capacidad de uso en agricultura

Todas las fincas visitadas se ubicaron en zonas de la sabana de Bogotá con suelos aptos para la agricultura, que pertenecen en un 96.6% a las subclases identificadas como IIc y IVhs, donde se practica agricultura intensiva y semi intensiva, respectivamente.

Para este estudio, 63.3% de los puntos muestreados se ubicaron en la subclase IIc (figura 1) que corresponden a un paisaje de planicie y un relieve de terraza. Tienen como principal limitante la ocurrencia de heladas. Cubren un área de 28 329 ha de los municipios visitados, en donde se encuentran cultivos transitorios como las hortalizas. En esta subclase se encontraron tres unidades de suelo, que se identifican con los símbolos RLQ, RMR, RMQ.

En los suelos aptos para agricultura semi intensiva de la subclase de nombre IVhs según IGAC, se encuentran terrenos planos con drenaje imperfecto donde el limitante consiste en el riesgo de inundación. Sin embargo, son suelos de buena calidad, donde también se concentran cultivos transitorios, como la lechuga. En esta investigación, 33.3% de las fincas visitadas se ubicaron en la subclase de suelo IVhs, y dentro de esta, a la unidad RMO que tiene un relieve de planos de inundación, en planicies cercanas al río Bogotá.

El porcentaje restante (3.4%) de las fincas de lechuga bajo estudio se ubicó en suelos de las subclases IIIps y IVp. Estos suelos se ubican en un paisaje de montaña, y por sus limitaciones y baja representatividad en fincas muestreadas, se consideraron zonas marginales de producción de lechuga.

La distribución de la muestra por unidad cartográfica de suelo fue la siguiente: siete puntos en la unidad RLQ, ocho en RMQ, cinco en RMR y nueve en RMO. Los dos puntos restantes se encontraron en zonas onduladas marginales. Estas unidades de suelo en su conjunto cubren 90% del área de Funza, 75% del área de Madrid, 60% del área de Mosquera y 42% del área de Facatativá. En Bojacá cubren 28% y en Soacha 24%. En el cuadro 1 se describen las características relevantes de las unidades de suelo representativas que fueron encontradas.

Identificación de fuentes de agua utilizadas para el riego del cultivo

La principal fuente de agua para riego en la zona la constituye el distrito de riego La Ramada, que cubre 13 140 hectáreas (CAR, 2011). En su área de influencia se encontró el 60% de los agricultores, correspondientes a los municipios de Mosquera y Funza.

Además, se observaron los ríos principales que atraviesan la zona, que fueron cinco: Bogotá, Bojacá, Subachoque, Balsillas y Apulo. En sus cercanías se encontraron fincas de horticultores, a una distancia promedio de 700 ± 483 m. Para calcular el área de influencia de los ríos se calculó un buffer con una banda alrededor de 1 666 m, que corresponde al promedio $\pm 2s$, y cubre el 95% de los casos observados según la distribución normal.

Cuadro 1

Propiedades de las unidades cartográficas de suelo correspondientes a los predios cultivados con lechuga Batavia en la sabana de Bogotá

Propiedad	Unidad cartográfica de suelo			
	RMQ	RLQ	RMR	RMO
Fertilidad	Moderada a alta	Moderada	Moderada	Moderada
pH	Moderado a ligeramente ácido (5.6 a 6.5)	Extremada a moderadamente ácido (3.5 a 6.0)	Extremadamente ácido a neutro (3.5 a 7.3)	Fuerte a moderadamente ácido (5.1 a 6.0)
Profundidad	Profundo a muy profundo (> 100 cm)	Moderadamente profundo a profundo (75-150 cm)	Superficial a profundo (25-150 cm)	Muy superficial (< 25 cm)
Drenaje	Moderadamente bueno a bueno	Imperfectamente bueno a bueno	Pobre a moderadamente bueno	Muy pobre a pobre
Tipo de relieve	Terraza	Terraza	Terraza	Plano de inundación
Limitante	Heladas frecuentes en épocas del año	Heladas frecuentes en épocas del año	Heladas frecuentes en épocas del año	Inundaciones ocasionales, drenaje imperfecto
Componentes taxonómicos	Complejo Pachic Haplustands, Humic Haplustands, Fluventic Dystrustepts	Complejo Pachic Melanudands Andic Dystrustepts Aeric Endoaquepts Aquic Hapludands	Complejo Humic Dystrustepts, Typic Haplustalfs, Fluvaquentic Endoaquepts	Asociación Aeric Epiaquents, Fluvaquentic Endoaquepts

Fuente: IGAC, 2020, ajustado por los autores.

Análisis espacial para la zonificación del cultivo de lechuga

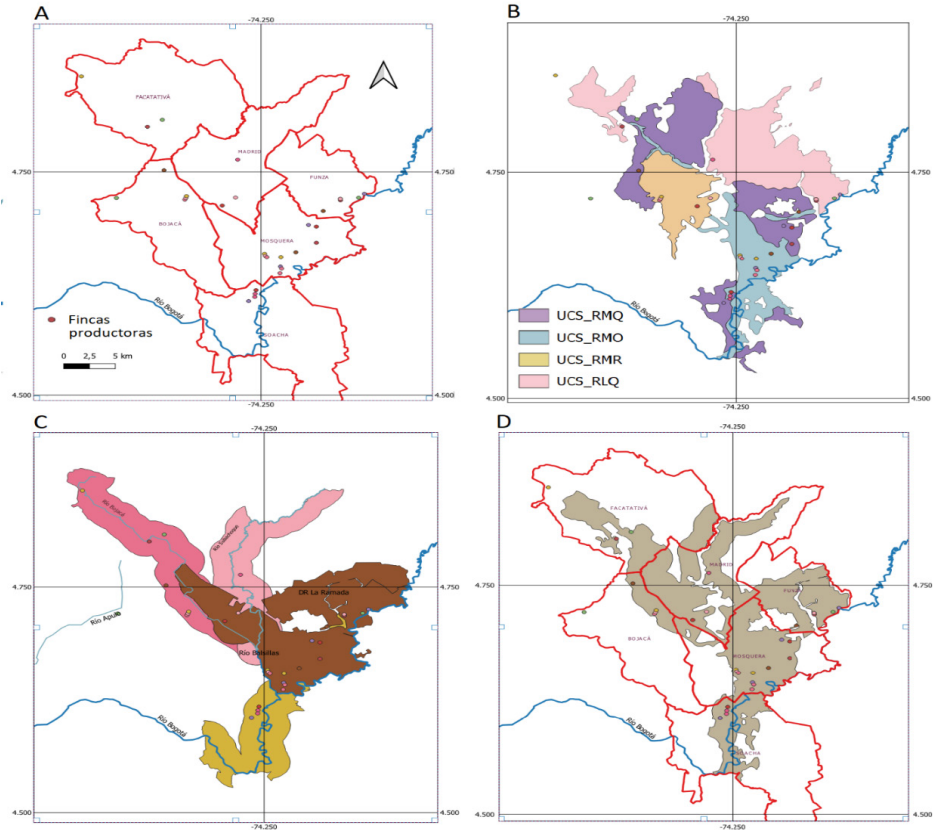
Con el área cubierta por los suelos asociados a los cultivos de lechuga y las zonas de influencia de los ríos principales utilizados como fuente de agua para riego, se realizó el análisis espacial mediante herramientas de geoprocso (intersección de los tres factores: municipio, suelo apto y disponibilidad de agua para riego) en QGIS. Para tal fin, primero se demarcaron los municipios

destacados por su producción de lechuga en Cundinamarca (figura 1A); luego, en otra capa, se definieron las unidades cartográficas según la capacidad de uso del suelo asociadas a las fincas productoras muestreadas (figura 1B) y, por último, se estimó el cubrimiento de las áreas con disponibilidad de agua para riego, incluyendo el distrito de riego La Ramada (figura 1C). La combinación de estas capas por intersección arrojó el área apta para el cultivo de lechuga (figura 1D).

Con análisis se calculó que el área apta para el cultivo de lechuga, con base en las características de las fincas muestreadas, cubría un total de 25 000 ha, concentradas especialmente en los municipios de Madrid, Funza y Mosquera, y en menor proporción en Facatativá, Soacha y Bojacá.

Figura 1

Análisis espacial de la aptitud agrícola de los suelos de la sabana de Bogotá para el cultivo de lechuga Iceberg



A) Municipios productores. B) Unidades cartográficas. C) Áreas con disponibilidad de agua para riego, incluyendo el distrito de riego La Ramada (color café). D) Área apta final por intersección de las anteriores.

Caracterización y análisis de la fertilidad química

Según los resultados de la muestra (cuadro 2), el pH promedio para las fincas cultivadas con lechuga fue de 6.4, ligeramente inferior del rango óptimo para el cultivo. Los niveles de materia orgánica del suelo (MOS) están por debajo del rango ideal. Además, se evidencian niveles excesivamente altos de algunos nutrientes, especialmente cierto para nutrientes como P, Ca, Mg, K y Zn.

Cuadro 2

Valores promedio y desviación estándar de las propiedades químicas del suelo y porcentaje de fincas con niveles altos de acuerdo con el rango ideal propuesto por Gómez (2011)

Propiedad	Unidad	Rango ideal	Año 1		Año 2	
			Promedio \pm sd	Casos altos (%)	Promedio \pm sd	Casos altos (%)
pH			6.4 \pm 0.7		6.4 \pm 0.5	
CE	dS/m		1.2 \pm 0.6		1.8 \pm 1.2	
MOS	g/100g	10.0-12.0	7.5 \pm 3.7		5.8 \pm 3.0	
P	mg/kg	25.0-40.0	188.6 \pm 114.0	91.7	213.8 \pm 142.1	100.0
H ⁺ + Al ⁺⁺⁺	cmol ⁽⁺⁾ /100g		0.0 \pm 0.1	0.0	0.0 \pm 0.0	0.0
Ca	cmol ⁽⁺⁾ /100g	5.0-10.0	16.7 \pm 7.7	91.7	17.2 \pm 5.6	100.0
Mg	cmol ⁽⁺⁾ /100g	2.5-3.0	3.8 \pm 1.6	58.3	4.7 \pm 1.53	100.0
K	cmol ⁽⁺⁾ /100g	0.3-0.4	1.6 \pm 1.2	100.0	1.9 \pm 0.6	100.0
Na	cmol ⁽⁺⁾ /100g	< 1.0	1.1 \pm 0.7	33.3	1.1 \pm 0.7	41.7
CICE	cmol ⁽⁺⁾ /100g	15.0-20.0	23.1 \pm 9.3	58.3	24.9 \pm 6.8	83.3
Fe	mg/kg	50.0-100.0	331.6 \pm 274.9	66.7	362.7 \pm 410.6	66.7
Mn	mg/kg	15.0-20.0	6.0 \pm 5.0	0.0	11.7 \pm 23.4	8.3
Zn	mg/kg	3.0-4.0	16.3 \pm 11.6	100.0	16.7 \pm 7.6	91.7
Cu	mg/kg	2.0-3.0	2.8 \pm 0.8	25.0	4.3 \pm 2.7	58.3
B	mg/kg	0.4-0.9	0.9 \pm 0.5	25.0	1.0 \pm 0.2	66.7
SAT Ca	%	66.0-70.0	71.4 \pm 9.3	66.6	68.7 \pm 7.0	33.3
SAT Mg	%	15.0-25.0	17.1 \pm 6.3	16.7	19.1 \pm 4.9	8.3
SAT K	%	5.0-6.0	6.4 \pm 3.6	50.0	7.9 \pm 2.4	75.0
SAT Al	%	< 20.0	0 \pm 0		0 \pm 0	0.0
Ca/Mg		3.0-4.0	5.0 \pm 2.9	25.0	3.9 \pm 1.4	25.0
Ca+Mg/K		10.0-20.0	18.3 \pm 10.0	33.3	12.3 \pm 4.6	50.0
Mg/K		6.0-8.0	3.5 \pm 2.5	8.3	2.6 \pm 0.8	0.0
Ca/B		1000.0-2000.0	3807.3 \pm 2134.8	100.0	3243.8 \pm 1035.7	100.0

Comparación de la fertilidad entre subclases de suelo

La comparación estadística de las propiedades del suelo observadas con el muestreo entre las subclases de suelo IIc y IVhs (cuadro 3), indica que los de la subclase IVhs tienen mayor concentración de Na, mayor conductividad eléctrica y menor contenido de potasio. En las otras propiedades químicas del suelo, no se evidenciaron diferencias significativas.

Cuadro 3

Comparación de las clases de suelo II y IV en cuanto a propiedades químicas del suelo (promedios \pm error estándar, $n_{II} = 19$, $n_{IV} = 9$)

Propiedades	Unidades	Clases de suelo		Valor P
		II	IV	
pH		6.43 \pm 0.14	6.10 \pm 0.15	0.1316
CE	dS/m	1.33 \pm 0.16	1.90 \pm 0.17	0.0234*
MO	g/100g	7.84 \pm 0.84	6.12 \pm 0.55	0.0974
Acidez intercambiable	cmol ⁽⁺⁾ /100g	0.04 \pm 0.03	0.02 \pm 0.02	0.6347
Al	cmol ⁽⁺⁾ /100g	0.02 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00	0.2869
P	mg/kg	184.33 \pm 23.70	185.33 \pm 31.21	0.9802
S	mg/kg	90.57 \pm 13.95	84.86 \pm 14.42	0.7786
CICE	cmol ⁽⁺⁾ /100g	21.77 \pm 1.82	21.68 \pm 1.78	0.9724
Ca	cmol ⁽⁺⁾ /100g	15.09 \pm 1.43	14.91 \pm 1.45	0.9274
Mg	cmol ⁽⁺⁾ /100g	3.91 \pm 0.35	3.97 \pm 0.22	0.8902
K	cmol ⁽⁺⁾ /100g	1.72 \pm 0.23	0.84 \pm 0.13	0.0028*
Na	cmol ⁽⁺⁾ /100g	1.01 \pm 0.15	1.94 \pm 0.21	0.0024*

* El asterisco en la fila señala diferencias estadísticas significativas entre los valores medios de la propiedad química respectiva de las dos clases de suelo ($p < 0.05$), según la prueba t.

Análisis de componentes principales

El resultado del ACP sobre las propiedades del suelo arrojó cuatro componentes que explicaron 73.4% de la varianza total de las 14 variables que describen las propiedades químicas del suelo. Los componentes 2 y 3 (figura 2) explicaron 34% de la varianza y permitieron diferenciar las unidades de suelo observadas en los seis municipios estudiados. El componente 2 está relacionado con los efectos adversos de la salinización del suelo, en cuanto que varía inversamente con los niveles de CE y las concentraciones de Na y S. El componente 3 se asocia con el efecto positivo de la MOS, que se contrarresta con el efecto del pH alto.

Comparación de la fertilidad entre las unidades de suelo

Con el análisis de componentes principales se pudo caracterizar cada una de las unidades de suelo encontradas en las zonas productoras de lechuga (figura 3). Según estos resultados, los suelos de la unidad RMQ presentan variabilidad en estos componentes y no se diferencian de otros suelos. Esta unidad también presentó la mayor dispersión geográfica en las áreas de la sabana de Bogotá, con respecto a las demás unidades cartográficas analizadas.

Figura 2

Aporte de las propiedades del suelo a la construcción de los componentes 2 y 3 del ACP

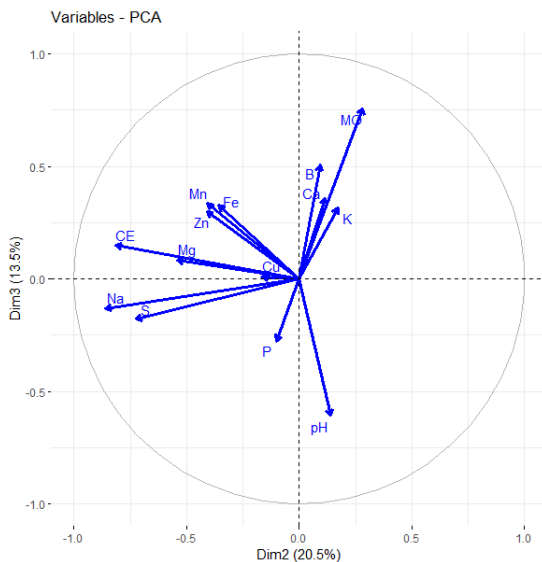
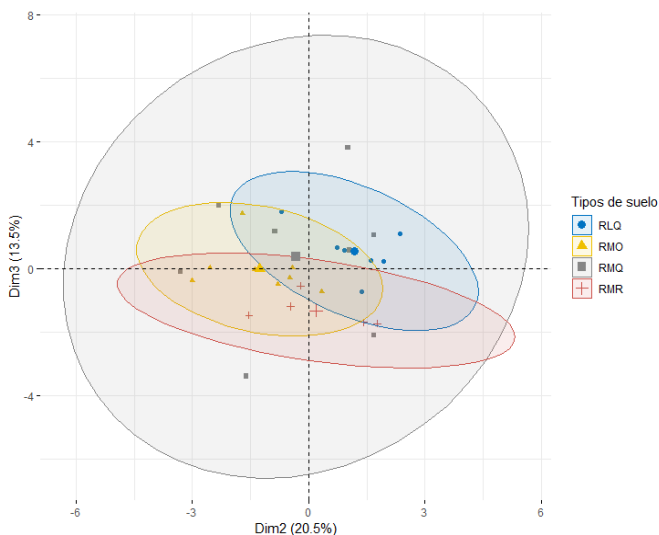


Figura 3

Agrupación de las unidades cartográficas de suelo según los componentes 2 y 3 del ACP



Para el componente de salinidad, el suelo RMO está significativamente ($P < 0.01$) por debajo (más salino) de los suelos RLQ y RMR, lo cual es consistente con el resultado del análisis de subclases de suelo antes expuesto. Esta tendencia a la salinidad del suelo RMO se agrava considerando su condición de suelo muy superficial.

En el componente asociado al efecto de la MOS, los suelos RMR están por debajo de RLQ y RMO ($P < 0.01$); en este sentido, los suelos RLQ y RMO presentan mayores contenidos de MO y bajos niveles de pH que favorecen la disponibilidad del B, respecto a los suelos RMR.

Efecto de la fertilidad de los suelos bajo estudio en el rendimiento del cultivo de lechuga

A pesar de las diferencias en las propiedades del suelo, el rendimiento de los cultivos de lechuga aparentemente no se ve afectado (cuadro 4). La comparación de RMR contra RMO, en cuanto a rendimiento del cultivo no fue significativa ($P = 0.29$), aunque fue la diferencia más grande observada (4.7 t/ha).

Cuadro 4

Rendimiento de los cultivos de lechuga por Unidad Cartográfica de Suelo (UCS) y comparación por pares con la prueba t ($\alpha = 0.05$)

UCS	t/ha	Error estándar	Valor P para las comparaciones pareadas entre UCS		
			RMO	RMQ	RMR
RLQ	50.0	4.0	0.95	0.80	0.35
RMO	49.4	7.2		0.73	0.29
RMQ	52.3	4.5			0.46
RMR	59.6	8.2			

Discusión

El análisis de fertilidad química del suelo refleja el efecto aparente del exceso de fertilización, práctica con la cual se supera ampliamente los requerimientos de los cultivos, y en particular, de la lechuga, lo cual confirma lo reportado por Forero y Escobar (2010), quienes además argumentan que tales excesos pueden ser de las principales causas de deterioro del suelo y del medio ambiente. Ello se explica en parte porque los agricultores aplican el fertilizante para una cosecha, pero la mineralización y la disponibilidad final de los nutrientes pueden tardar mucho tiempo, más allá del ciclo de cultivo (Orden *et al.*, 2022).

Una práctica recomendable para el cultivo de lechuga es la aplicación en enmiendas para corregir el pH, especialmente por problemas de acidez. Para el óptimo crecimiento de plantas de lechuga se requieren suelos con pH entre 6.6 y 7.3 (ICA, 1992; Jaramillo *et al.*, 2014; Nisha *et al.*, 2018.). Sin embargo, Roosta (2011, 6, 7, and 8) encontró que un pH de 5.8 es el mejor para una óptima disponibilidad de nutrientes en lechuga

hidropónica, debido a que con un pH más alto el manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y especialmente el Fe se reducen significativamente. A pesar de lo anterior, se considera que, en el suelo y debido a su capacidad buffer (que no está presente en las soluciones hidropónicas), el rango de pH entre 6.6 y 7.3 es el óptimo. El promedio observado está por debajo de este rango; sin embargo, los niveles altos de calcio que se observan en el análisis de suelo previenen la aplicación de enmiendas de cal para corregir el pH.

Actualmente, el problema que se presenta en los cultivos de lechuga y otras hortalizas se puede explicar, además, por el desbalance de nutrientes; por ejemplo, la disponibilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) para las plantas, no sólo dependen de su concentración en el complejo de cambio y en la solución, sino también de la competencia que se puede presentar entre estos y otros elementos (Sadeghian, 2012). Los altos contenidos de Ca encontrados (cuadro 2) pueden afectar negativamente la disponibilidad del B, y así mismo, la saturación alta de K puede reducir la disponibilidad de Mg (100% de las muestras están por debajo del rango óptimo de la relación Mg/K).

Un déficit de potasio por desbalance podría reducir la capacidad productiva de un cultivo de lechuga, debido a que como mencionan Zhang *et al.* (2017), para este cultivo las bajas concentraciones del elemento causan reducciones tanto en la tasa neta de asimilación, como en la proporción de área foliar, lo cual conduce a una disminución de la tasa de crecimiento relativa. Además, la tasa fotosintética de las hojas maduras disminuye significativamente, debido a que los factores no estomáticos suprimen la fotosíntesis.

La problemática del suelo se agrava en los suelos de la subclase IVhs, por su mayor concentración de Na y mayor conductividad eléctrica respecto a la subclase IIc, lo cual conlleva el riesgo de un aumento de la salinidad para un cultivo moderadamente sensible, como es la lechuga (Carranza *et al.*, 2009), que presenta un umbral de tolerancia de 1.3 dS/m en pasta saturada del suelo, con un porcentaje de reducción en el rendimiento de 13% por cada dS/m adicional. Además, los suelos de la subclase IVhs tienen menor contenido de potasio, elemento que se requiere en gran cantidad por el cultivo de lechuga (Incrocci *et al.*, 2017).

Con el análisis de componentes principales hay que considerar lo que observaron Mutuku *et al.* (2021), en cuanto que las prácticas que favorecen el aumento de la MOS también mejoran la eficiencia agronómica de la fertilización, especialmente en los suelos con bajas concentraciones de carbono orgánico y altos niveles de pH, cercanos a la neutralidad. Esto alerta, además, la necesidad de regular el uso de cal para subir el pH, una práctica que se consideró necesaria en la sabana de Bogotá dada la condición natural de alta acidez de los suelos, pero actualmente parece en algunos casos innecesaria según la muestra analizada.

Los suelos de la unidad cartográfica RMO tienen mayor tendencia a la salinidad, lo cual se agrava considerando su condición de suelo muy superficial. Si la CE llegase a niveles por encima de 2 dS/m y la concentración de sodio aumentara, el efecto sería perjudicial para la nutrición de las plantas, aunque un bajo nivel de estrés (eustrés) podría estimular una mejor calidad del producto a cosechar (Carillo *et al.*, 2021). Se destaca

que los suelos de la unidad RMO, por su mayor salinidad y su condición superficial, requieren un manejo conservacionista.

Los suelos RLQ y RMO presentan mayores contenidos de MOS y bajos niveles de pH, condiciones que están relacionados con prácticas de fertilización y abonado que, de no manejarse técnicamente, pueden acarrear problemas de acumulación de sales y desbalances nutricionales (Orden *et al.*, 2022). En contraste, los suelos RMR presentan menores contenidos de MOS, pero debido a que está asociado a un pH más alto, se puede manejar agrónomicamente con un abonado adecuado.

Es urgente racionalizar la fertilización del cultivo de lechuga y otras hortalizas para prevenir daños mayores en las propiedades químicas de los suelos de la sabana de Bogotá. Hasta el momento, la salinidad no parece ser una limitante para el cultivo de lechuga y, como se observó anteriormente, las zonas presentan un pH adecuado, incluso alto para la condición natural de los suelos por su origen. Dado que la problemática no se presenta de manera homogénea o generalizada en las zonas productoras de hortalizas, el manejo ideal debe hacerse con agricultura específica por sitio (Liu *et al.*, 2021).

A pesar de las diferencias en las propiedades del suelo, el rendimiento de los cultivos de lechuga aparentemente no se ve afectado. Esto no significa que dejen de tomarse acciones para prevenir problemas futuros por la tendencia observada en la acumulación de sales y la tendencia al alza del pH. Como discuten Villalba *et al.* (2020), el sistema de manejo del suelo afecta la calidad y sostenibilidad de la producción agrícola, lo cual depende también de las especies vegetales cultivadas, pero sus efectos se revelan después de varios años.

Conclusiones

Con las condiciones de suelo asociadas a los cultivos observados, se concluyó que existe un área apta de 25 000 ha en los principales municipios productores de lechuga de Cundinamarca, que cuentan con acceso a fuentes de agua para riego y suelos planos y fértiles.

Se encontró, según los predios evaluados con el cultivo de lechuga, el predominio de las unidades cartográficas de suelo RMR, RMO, RMQ y RLQ, de las subclases IIc y IVhs. En estos suelos se constatan diferencias en las propiedades químicas relacionadas con la concentración de K, la salinidad y el pH con relación a la materia orgánica. Los análisis de fertilidad del suelo reflejan, además, exceso de fertilización con una exagerada concentración de nutrientes. Se destaca que los suelos de la unidad RMO tienen mayor salinidad y son muy superficiales.

Literatura citada

- AgroNet. (2021). Estadísticas agropecuarias, reporte área, producción, rendimiento y participación municipal en el departamento por cultivo. Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano. Bogotá, Colombia. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4> (Consulta 7 julio 2021)
- Angulo, J.; Martínez-Salgado, M.; Ortega-Blu, R. y Fincheira, P. (2020). Combined effects of chemical fertilization and microbial inoculant on nutrient use efficiency and soil quality indicators. *Scientia Agropecuaria*. 11 (3): 375-380. doi: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.09>

- Orden, L.; Iocoli, G.A.; Bustamante, M.Á.; Moral, R.; Rodríguez, R.A. (2022). Nutrient Release Dynamics in Argentinean Pampean Soils Amended with Composts under Laboratory Conditions. *Agronomy*. 12: 795. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040795>
- Quiñones, A.; Rodríguez-Carretero, I.; Pérez-Piqueres, A. y Canet, R. (2019). Retos de la fertilización de la nueva citricultura valenciana: Recomendación de abonado para el nuevo mapa varietal. *Vida Rural*. 6: 56-60.
- Roosta, H.R. (2011). Interaction between water alkalinity and nutrient solution ph on the vegetative growth, chlorophyll fluorescence and leaf magnesium, iron, manganese, and zinc concentrations in lettuce. *Journal of Plant Nutrition*. 34(5): 717-731. doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.540687>
- Ruttenberg, K.C. (2014). The global phosphorus cycle. In: H.D. Holland y K.K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry, Second* (Pp. 499-558). Ed. Elsevier, Oxford, U.K..
- Sadeghian, S. (2012). Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo. Tesis Doctorado en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Salinas-Velandia, D.A.; Alarcón, K.A.; y Forero-Camacho, C.A. (2022a). Adopción de tecnología en la política de competitividad colombiana Conpes 3527: Caso cebolla de bulbo 2008-2016. *Espamciencia*. 13(1): 39-51. doi: https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v13i1.270
- Salinas-Velandia, D.A.; Romero-Perdomo, F.; Numa-Vérgel, S.; Villagrán, E.; Donado-Godoy, P.; Galindo-Pacheco, J.R. (2022b). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 19: 12053. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>
- Shen, J.; Dan, E.; Lu, Y.; Guo, Y. (2021). Exploratory Research on Overfertilization in Grain Production and Its Relationship with Financial Factors: Evidence from China. *Sustainability*. 13: 2176. <https://doi.org/10.3390/su13042176>
- Song, Q.; Fu, H.; Shi, Q.; Shan, X.; Wang, Z.; Sun, Z. y Li, T. (2022). Overfertilization reduces tomato yield under long-term continuous cropping system via regulation of soil microbial community composition. *Front. Microbiol.* 13: 952021. doi: 10.3389/fmicb.2022.952021
- U.S. Department of Agriculture (2018). Summary Report: 2015 National Resources Inventory. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, and Center for Survey Statistics and Methodology, Iowa State University, Ames, Iowa. Disponible en: <http://www.nrcs.usda.gov/technical/nri/15summary> (Consulta 15 septiembre 2020).
- Villalba, C.A.; Merino, A. y Etchevers, J. (2020). Diagnóstico de la fertilidad química de suelos (Rhodic Paleudult) en sistemas agrarios y forestales de la región oriental de Paraguay. *Investigación Agraria*. 22: 92-99. doi: <http://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.diciembre.2202658>.
- Yau, C. (2009) R Tutorial with Bayesian Statistics Using Stan, 1st ed.; R Tutorials: Cupertino, CA, USA, 563 p.
- Zandvakili, O.; Barker, A.; Hashemi, M.; Etemadi, F. y Autio, W. (2019). Comparisons of commercial organic and chemical fertilizer solutions on growth and composition of lettuce. *Journal of Plant Nutrition*. 42(9): 990-1000. doi: 10.1080/01904167.2019.1589505
- Zhang, G.; Johkan, M.; Hohjo, M.; Tsukagoshi, S. y Maruo, T. (2017). Plant growth and photosynthesis response to low potassium conditions in three lettuce (*Lactuca sativa*) types. *Horticulture Journal* 86(2): 229-237. doi: <https://doi.org/10.2503/hortj.OKD-008>

Recepción: 25 de junio de 2022

Arbitraje: 9 de agosto de 2022

Dictamen: 23 de octubre 2022

Aceptado: 5 de diciembre 2022