



**Efecto del aprovechamiento forestal de  
*Calophyllum brasiliense* sobre las propiedades  
químicas y microbiológicas de suelos aluviales  
en el Caribe de Costa Rica**

**Luis Armando Mazariegos Calderón**

**Flor de María Rivas Sánchez**

Proyecto de Graduación  
para obtener el título de  
Ingeniero(a) Agrónomo(a)  
con el grado académico de  
Licenciatura en Ciencias Agrícolas

Guácimo, Limón, Costa Rica

2025



La Universidad EARTH certifica que el Proyecto de Graduación titulado

Efecto del aprovechamiento forestal de *Calophyllum brasiliense*  
sobre las propiedades químicas y microbiológicas de suelos  
aluviales en el Caribe de Costa Rica

Presentado por

Luis Armando Mazariegos Calderón

Flor de María Rivas Sánchez

Reúne las condiciones para obtener el título de Ingeniero(a) Agrónomo(a)  
con el grado académico de Licenciatura

**Asesor**

Victor Hugo Morales Peña, Ph.D.

Diciembre 2025



## **Dedicatoria**

A Dios, que guía mis pasos y sostiene mis sueños, por darme la fuerza, la paciencia y la sabiduría para superar los desafíos y mantener la fe en cada momento de este camino. A mis padres y hermanos, cuyo amor incondicional, ejemplo de vida y enseñanzas me han inspirado a luchar por mis metas. A mi familia por su apoyo constante, por sus palabras de aliento en los momentos de dificultad y por celebrar conmigo cada pequeño logro. Y a mis donantes, gracias a quienes esta meta se hizo posible, brindándome la oportunidad de crecer, aprender y hacer realidad un sueño que sin su generosidad no habría sido posible. A todos ustedes dedico este logro, que lleva en cada letra un pedazo de su amor, su fe, su apoyo y su compromiso, y que refleja lo que me han enseñado y compartido conmigo.

***Flor Rivas***

A Dios, por regalarme la vida y la fortaleza para culminar esta etapa tan importante en mi vida. Gracias por concederme discernimiento y sabiduría para enfrentar y superar cada obstáculo en el camino hacia la realización de este sueño. A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante desde el inicio. Sin ellos, cumplir mis metas y sueños no habría sido posible. A mis amigos de la universidad, quienes me demostraron que una amistad verdadera es un apoyo fundamental en los momentos más difíciles, capaz de brindar fuerza y esperanza cuando más se necesita.

***Luis Mazariegos***

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este proyecto. A mi asesor Víctor Hugo por su apoyo y confianza. A mi compañero de PG Luis Mazariegos por su apoyo y colaboración en cada etapa de este trabajo, a Celeste Bueso por su apoyo en la recolección de datos. A mis amigas por su compañía y palabras de aliento en los momentos difíciles. A cada miembro de mi familia, que me acompaña, apoyó y alentó en todo este proceso, por su paciencia, confianza y amor incondicional, les extiendo mi más sincera gratitud.

***Flor Rivas***

Expreso mi más profunda gratitud a todas las personas que hicieron posible este proyecto. A mi asesor, Víctor Hugo Morales, por su confianza y apoyo incondicional durante todo el proceso. A mi compañera de PG, Flor Rivas, por su colaboración y apoyo constante en cada etapa de este trabajo. A Celeste Bueso, mi compañera de experiencia de trabajo, por su valioso apoyo en la recolección de datos. A mi familia, mi mayor bendición, agradezco profundamente su amor incondicional, su apoyo constante, sus palabras de ánimo y su confianza. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. También agradezco a mis amigos, quienes, con su amistad, compañía, comprensión, apoyo emocional y amor incondicional, hicieron el camino mucho más llevadero y lleno de alegría en los momentos difíciles.

***Luis Mazariegos***



## Resumen

El presente proyecto evaluó el impacto del aprovechamiento forestal de la especie Cedro María (*Calophyllum brasiliense*) sobre las propiedades químicas y microbiológicas de suelos aluviales en la región del Caribe de Costa Rica. El estudio se desarrolló en una plantación de la Universidad EARTH, Guácimo, Limón en un clima tropical húmedo con suelos Inceptisoles y Entisoles de textura franco-arcillosa y pH ácido. Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con dos tratamientos: con raleo (CR) y sin raleo (SR), evaluando variables de la concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, pH, conductividad eléctrica y actividad microbiana en tres momentos clave; dos muestreos antes, uno durante y dos después del aprovechamiento forestal. El modelo lineal mixto incluyó los factores manejo y medición como efectos fijos, mientras que el bloque y la parcela se incluyeron como efectos aleatorios. Los resultados demostraron que la intervención por raleo no generó cambios significativos en las propiedades del suelo en términos generales, aunque sí afectó la dinámica temporal y la variabilidad espacial de ciertas variables como el pH, conductividad eléctrica y la actividad microbiana. Se observó una disminución del pH en momentos específicos bajo manejo sin raleo, asociado a un aumento de acidez y posibles alteraciones en la disponibilidad de nutrientes. La conductividad eléctrica mostró picos de sales solubles que podrían afectar la actividad microbiana, la cual presentó una respuesta significativa según el manejo aplicado. Las correlaciones evidenciaron la influencia del pH en la actividad microbiana y una mayor heterogeneidad de nutrientes en áreas con raleo. El estudio concluye que, aunque el análisis estadístico no detectó cambios drásticos inmediatos en las condiciones generales del suelo, las prácticas de aprovechamiento forestal selectivo modifican las características edáficas de manera temporal y espacial, afectando la sostenibilidad del ecosistema. Es por ello por lo que es crucial implementar manejos forestales sostenibles que minimicen el impacto en el recurso suelo para garantizar la productividad futura de las plantaciones y la conservación del ecosistema de suelos aluviales tropicales.

**Palabras clave:** *Calophyllum brasiliense*, Propiedades químicas del suelo, actividad microbiana del suelo, pH del suelo, sensores portátiles, mapas de fertilidad, manejo forestal, degradación del suelo, interpolación.

## Abstract

The present project evaluated the impact of forest harvesting of the species Cedro María (*Calophyllum brasiliense*) on the chemical and microbiological properties of alluvial soils in the Caribbean region of Costa Rica. The study was conducted in a plantation located at EARTH University, Guácimo, Limón, under a humid tropical climate with Inceptisol and Entisol soils of loam-clay texture and acidic pH. A randomized complete block design was used with two treatments: thinning (CR) and no thinning (SR). Nitrogen, phosphorus, potassium, pH, electrical conductivity, and microbial activity were evaluated at five sampling times—two before, one during, and two after forest harvesting. A linear mixed model included management and sampling time as fixed effects, while block and plot were treated as random effects. Results showed that thinning did not generate significant changes in overall soil properties, although it affected the temporal dynamics and spatial variability of certain variables such as pH, electrical conductivity, and microbial activity. A decrease in pH was observed at specific times under the no-thinning treatment, associated with increased acidity and possible alterations in nutrient availability. Electrical conductivity exhibited peaks of soluble salts that may influence microbial activity, which responded significantly to the applied management. Correlation analyses revealed the influence of pH on microbial activity and greater nutrient heterogeneity in thinned areas. The study concludes that, although statistical analysis detected no immediate drastic changes in general soil conditions, selective forest harvesting modifies soil characteristics temporally and spatially, affecting ecosystem sustainability. Therefore, it is crucial to implement sustainable forest management practices that minimize soil impact to ensure future plantation productivity and the conservation of tropical alluvial soil ecosystems.

**Keywords:** *Calophyllum brasiliense*, soil chemical properties, soil microbial activity, soil pH, portable sensors, fertility maps, forest management, soil degradation, interpolation.

# Índice

Página

<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>4</b>
2.1    Objetivo General.....	4
2.2    Objetivos Específicos .....	4
<b>3 Metodología</b> .....	<b>5</b>
3.1    Ubicación del área de estudio.....	5
3.1.1    Localización .....	5
3.2    Caracterización del sitio.....	5
3.2.1    Clima	5
3.2.2    Zona de Vida .....	5
3.2.3    Caracterización de los tipos de suelo .....	6
3.3    Diseño experimental.....	6
3.3.1    Variables de estudio .....	7
3.3.2    Puntos y tiempos de muestreo.....	8
3.3.3    Medición de nitrógeno, fósforo y potasio .....	9
3.3.4    Medición de pH.....	10
3.3.5    Medición de actividad microbiológica .....	10
3.3.6    Validación de las mediciones de campo.....	11
3.4    Análisis de datos .....	11
3.4.1    Interpolación inversa de la distancia (IDW) .....	11
<b>4 Resultados</b> .....	<b>12</b>
4.1    Análisis exploratorio de los datos .....	12
4.2    Análisis de variabilidad espacial y temporal.....	12
4.3    Análisis de correlación de las variables físicas y microbiológicas .....	17
<b>5 Discusión</b> .....	<b>20</b>
5.1    Variación de las propiedades químicas y microbiológicas del suelo .....	20
5.2    Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo entre áreas con raleo y áreas sin intervención.....	20
5.3    Correlación de las variables químicas y microbiológicas del suelo entre áreas con raleo y sin raleo utilizando coeficientes de correlación. ....	21

<b>6 Conclusiones.....</b>	<b>22</b>
<b>7 Literatura Citada.....</b>	<b>23</b>
<b>8 Anexos .....</b>	<b>26</b>
Anexo 1. ANOVA de variables químicas y microbiológicas del suelo. ....	26
Anexo 2. a) Distribución de los datos de pH, b) Distribución de los datos de CE, c) Distribución de los datos de N, d) Distribución de los datos de P, e) Distribución de los datos de K.....	27
Anexo 3. Evolución temporal de las variables. a) Evolución temporal de N, P, K a través del tiempo, b) Evolución temporal de la actividad microbiana a través del tiempo, c) Evolución temporal del pH a través del tiempo, d) Evolución temporal de la conductividad eléctrica a través del tiempo.....	28
Anexo 4. a) Normalidad de los residuos de pH, b) Normalidad de los residuos de CE, c) Normalidad de los residuos de N, d) Normalidad de los residuos de P, e) Normalidad de los residuos de K. ....	29
Anexo 5. a) Homogeneidad de la varianza de pH, b) Homogeneidad de la varianza de CE, c) Homogeneidad de la varianza de N, d) Homogeneidad de la varianza de P, e) Homogeneidad de la varianza de K. ....	30
Anexo 6. Resultados de análisis de correlación de las variables en el manejo con raleo. ....	31
Anexo 7. Resultados de análisis de correlación de las variables en el manejo sin raleo. ....	31
Anexo 8. Resultados del <i>P</i> valor de la correlación en las variables del manejo con raleo. ...	31
Anexo 9. Resultados del <i>P</i> valor de la correlación en las variables del manejo sin raleo.....	32
Anexo 10. Resultados del promedio de la interpolación. ....	32

## 1 Introducción

Las plantaciones forestales representan una alternativa económica clave para el desarrollo sostenible. No solo contribuyen a la producción de materia prima para diversas industrias, como la construcción, la fabricación de muebles y papel, sino que también desempeñan un papel fundamental en la protección de los recursos naturales asociados (Koutika et al., 2022). Estas plantaciones han sido reconocidas como una herramienta efectiva para mitigar la deforestación de bosques naturales, al proveer una fuente renovable y planificada de productos forestales (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022). Además, se integran en programas de restauración ecológica y pueden ofrecer servicios ecosistémicos como la fijación de carbono, protección del suelo y la regulación del ciclo hídrico.

Sin embargo, el desarrollo de la industria forestal ha sido frecuentemente percibido como una fuerza destructiva en lugar de un componente esencial para la sostenibilidad ambiental. Gómez-González et al., (2024), en su análisis reciente, hacen referencia a que las plantaciones forestales, junto con su proceso de producción industrial pueden tener efectos adversos sobre la biodiversidad y afectar servicios ecosistémicos clave. Su explotación comercial mediante el aprovechamiento forestal selectivo o por tala rasa genera impactos sobre el ecosistema edáfico, que aún no ha sido suficientemente estudiados.

En este contexto, el manejo de especies forestales de alto valor comercial, como el Cedro María (*Calophyllum brasiliense*), ha sido considerablemente implementado en regiones tropicales, debido a su capacidad de adaptación a diversas condiciones edafoclimáticas. Según Caicedo (2009) esta especie es una de las plantas forestales en la Región Pacífica que aporta un valor económico, ecológico, nutritivo y medicinal, posee una madera de valor comercial, lo que ha llevado a su explotación intensiva. Además, *C. brasiliense* ha sido utilizado en programas de reforestación debido a su capacidad para prosperar en distintos tipos de suelo. Aunque presenta una dependencia micorrízica baja, las asociaciones simbióticas con hongos micorrizas pueden mejorar la absorción de nutrientes y la salud general del suelo (Sierra-Escobar et al., 2012).

No obstante, el aprovechamiento de este recurso genera efectos particularmente significativos en las propiedades del suelo. Por ello, resulta fundamental evaluar las condiciones del suelo tras la cosecha, con el fin de determinar su idoneidad para el establecimiento de otras plantaciones de ciclo corto. Según Lal (2005) y Lavelle et al (2006), el suelo es un componente clave para la sostenibilidad de cualquier ecosistema y su alteración compromete directamente la productividad futura de los sistemas forestales. En apoyo a esta afirmación, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), menciona que el 75 % de los suelos en América Latina y el Caribe presentan problemas de degradación física o química, principalmente por prácticas de manejo inadecuadas.

El suelo es un ecosistema complejo y diverso, que alberga una gran variedad de organismos que interactúan y desempeñan un papel crucial en los ciclos biogeoquímicos esenciales para la vida (FAO, 2015). En el trópico a diferencia de regiones templadas, depende en gran medida de la materia orgánica superficial, y su pérdida o perturbación puede reducir drásticamente la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica. Los suelos en el trópico húmedo suelen ser pobres en nutrientes y altamente dependientes de la materia orgánica superficial para mantener su fertilidad (Cascante & Estrada, 2001). Esta característica los hace especialmente vulnerables a procesos de degradación, como la pérdida de nutrientes y compactación, en particular cuando se someten a prácticas de manejo forestal intensivo (Brown-Salazar, 2020). Cualquier alteración significativa en las propiedades químicas o microbiológicas del suelo podría tener consecuencias graves para la sostenibilidad del ecosistema.

Si bien se han realizado estudios sobre su distribución, regeneración y características ecológicas, existen importantes vacíos en el conocimiento sobre cómo su aprovechamiento forestal afecta las propiedades químicas y microbiológicas del suelo. Al retirar la cobertura arbórea, el suelo queda expuesto a la acción del agua y el viento, lo que puede aumentar la erosión y la pérdida de nutrientes. Estas alteraciones físicas, químicas y biológicas del suelo subrayan la importancia de implementar prácticas de manejo forestal sostenible que minimicen el impacto sobre el suelo y mantengan su productividad a largo plazo.

A pesar de ello, existe una falta de estudios específicos que aborden esta problemática; aunque hay investigaciones sobre el impacto del manejo forestal en otras especies maderables tropicales (Brown-Salazar, 2020), pocos estudios han abordado específicamente al tema sobre el efecto del aprovechamiento de *Calophyllum brasiliense* sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo. Aspectos clave como la disponibilidad de nutrientes, la composición de la comunidad microbiana y la actividad enzimática del suelo después del aprovechamiento de plantaciones de esta especie siguen sin estar completamente comprendidos. El contenido de materia orgánica y el pH son indicadores clave de la fertilidad edáfica y la capacidad del suelo para sostener vegetación, estos factores controlan la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del suelo, siendo fundamentales para evaluar la resiliencia del ecosistema tras el aprovechamiento forestal.

En este estudio, se evaluaron los efectos del aprovechamiento forestal sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo. Los resultados muestran que, aunque el factor manejo no generó diferencias significativas en la mayoría de las propiedades del suelo, las mediciones a lo largo del tiempo evidenciaron efectos altamente significativos sobre pH, conductividad eléctrica (CE), fósforo (P), potasio (K) y actividad microbiana (AM). La interacción del manejo con la medición fue significativa para pH, CE y AM, indicando que el raleo modifica la respuesta temporal del suelo en estos parámetros. El pH disminuyó en el tratamiento sin raleo generando un entorno más ácido que afectó la solubilidad de nutrientes y la actividad microbiana, mientras que CE aumentó reflejando mayor concentración de sales solubles. El análisis espacial reveló una heterogeneidad marcada en la distribución de nutrientes y microorganismos, siendo mayor en las áreas con raleo. Esto evidencia la fragmentación inducida por el manejo afectando la

disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, resaltando la importancia de la cobertura vegetal y la materia orgánica en la regulación de los ciclos de nutrientes (Lal, 2005; Rodríguez-Rivera et al., 2018). Las correlaciones entre variables muestran que pH y actividad microbiana presentan relaciones opuestas según el tipo de manejo, destacando la sensibilidad de la biota microbiana a cambios en el entorno químico del suelo.

El propósito de esta investigación fue analizar cómo las actividades de aprovechamiento forestal afectan los parámetros químicos y microbiológicos del suelo, proporcionando información valiosa para mejorar las prácticas de manejo y sostenibilidad de plantaciones de *C. brasiliense* en ecosistemas tropicales. Los hallazgos permiten comprender la dinámica temporal y espacial del suelo, así como orientar estrategias que mantengan la productividad y los servicios ecosistémicos de manera sostenible.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto del aprovechamiento forestal de *Calophyllum brasiliense* sobre las propiedades químicas y microbiológicas del suelo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la variación de las propiedades químicas y microbiológicas del suelo antes, durante y después del aprovechamiento forestal.
- Analizar la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo entre áreas con raleo y áreas sin intervención.
- Correlacionar las variables químicas y microbiológicas del suelo entre áreas con raleo y sin raleo utilizando coeficientes de correlación.

### 3 Metodología

#### 3.1 Ubicación del área de estudio

##### 3.1.1 Localización

El experimento se llevó a cabo en la plantación forestal de Cedro maría (*Calophyllum brasiliense*), ubicada en la Universidad EARTH, Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica (Figura 1). Se encuentra entre las coordenadas 10°12'10" N y 83°35'28"W, a una elevación de 45 ms.n.m. (Google Earth, s.f.).

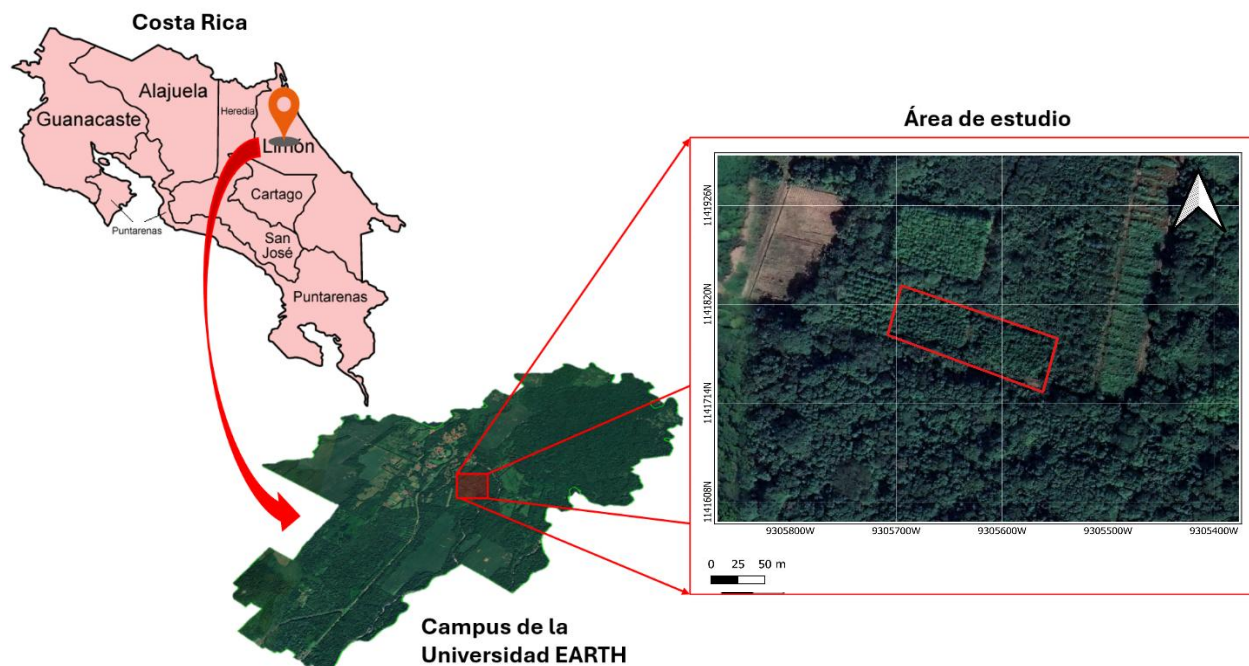


Figura 1. Ubicación del proyecto.

#### 3.2 Caracterización del sitio

##### 3.2.1 Clima

El clima del cantón Guácimo es cálido y húmedo durante todo el año. La estación meteorológica de la universidad EARTH registra una temperatura media anual que oscila entre 25 °C a 27 °C y la precipitación anual promedio supera los 3592 mm (Universidad EARTH, 2018). La distribución de las lluvias es relativamente constante, con una leve disminución entre febrero y marzo, sin llegar a constituir una estación seca (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica [IMN], 2023).

##### 3.2.2 Zona de Vida

Según la clasificación de zona de vida de Holdridge (1967) y su adaptación a Costa Rica por Tosi (1969), el área de estudio se encuentra en la zona de Bosque Húmedo Tropical (bh-T), caracterizada por una temperatura media anual cercana a 26 °C, precipitación anual entre los 3000 mm a 4000 mm, y sin una estación seca bien definida. Este tipo de zona de vida presenta una alta y densa cobertura vegetal durante todo el año, lo que favorece una elevada actividad biológica y una rápida descomposición de la materia orgánica. Estas condiciones climáticas

contribuyen al desarrollo de suelos ácidos y de fertilidad moderada a baja, típicos de regiones con intensa lixiviación de nutrientes.

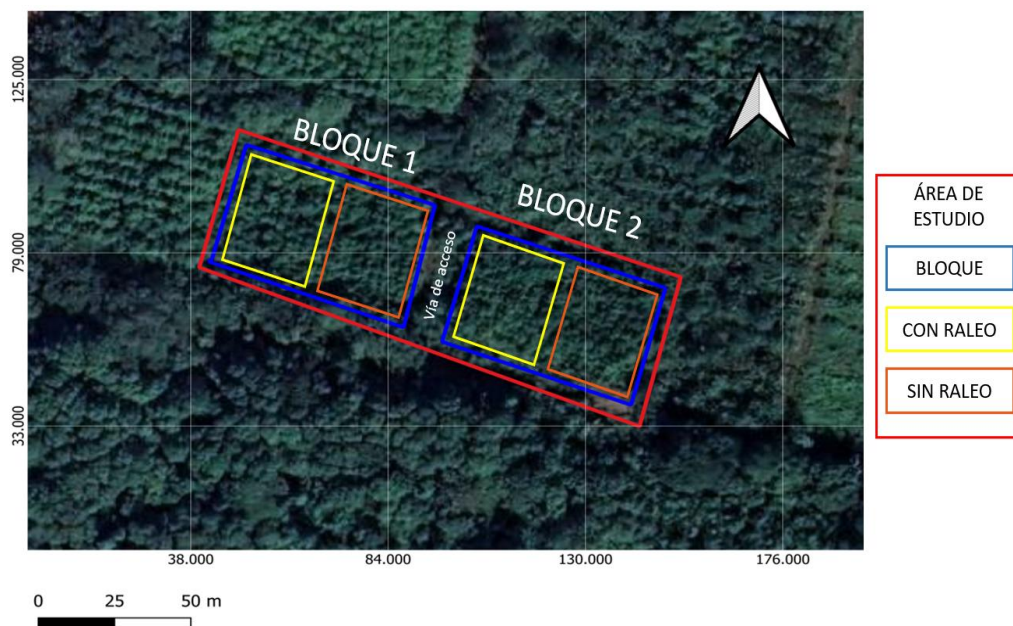
### 3.2.3 Caracterización de los tipos de suelo

Según estudios edafológicos realizados en la región, los suelos corresponden principalmente a Inceptisoles y entisoles, formados sobre materiales aluviales de origen volcánico. Los inceptisoles se caracterizan por un incipiente desarrollo de horizontes y una moderada acumulación de materia orgánica, mientras que los Entisoles son suelos jóvenes con escaso grado de evolución y poca diferencia de horizontes (FAO, 2015).

Estos presentan una textura franco-arcillosa, buena capacidad de retención de humedad, pH ácido (5.0 a 6.0) esto refleja procesos de lixiviación intensa y la presencia de aluminio intercambiable, común en regiones tropicales húmedas. Además de contenidos moderados de materia orgánica que indican una dinámica activa de descomposición y reciclaje de nutrientes debido a la alta temperatura y humedad del ambiente (FAO, 2015; Salas, 1987).

### 3.3 Diseño experimental

El experimento se basó en un diseño en bloques completos aleatorizados. La plantación se dividió en dos bloques delimitados por una vía de acceso (Figura 2). En cada bloque se aplicaron dos tratamientos, el primero correspondió al aprovechamiento con raleo, identificado como CR, y el segundo al tratamiento control sin raleo, identificado como SR. El experimento estuvo conformado por cuatro unidades experimentales (parcelas), cada una integrada por 20 árboles seleccionados para la toma de datos. Se realizaron cinco mediciones a lo largo del tiempo con el fin de evaluar las variaciones en las variables de estudio antes, durante y después de la aplicación del raleo.



**Figura 2.** Distribución de los tratamientos en el área de estudio. El experimento se estableció en dos bloques (Bloque 1 y Bloque 2) dentro del área delimitada en rojo. Cada bloque contiene dos parcelas correspondientes a los tratamientos con raleo (amarillo) y sin raleo (rojo).

El modelo estadístico se ajustó bajo un enfoque lineal mixto (Ecuación 1), en el cual los factores manejo y medición se establecieron como efectos fijos, mientras que el bloque y la parcela se incluyeron como efectos aleatorios.

$$Y_{ijkl} = \mu + Manejo_i + Medicion_j + (Manejo \times Medicion)_{ij} + Bloque_k + Parcela_{l(k)} + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Dónde: El modelo  $Y_{ijkl}$  describe la variación observada en una variable respuesta considerando tanto efectos fijos como aleatorios. La media general ( $\mu$ ) representa el valor promedio de la variable, mientras que los efectos fijos de manejo ( $Manejo_i$ ) y medición ( $Medicion_j$ ) explican las diferencias debido a los tratamientos y momentos de evaluación respectivamente. La interacción entre manejo y medición ( $Manejo \times Medicion$ )<sub>ij</sub> permite evaluar si el efecto del manejo cambia a lo largo del tiempo de las mediciones. Además, se incluyen efectos aleatorios del bloque ( $Bloque_k$ ) para considerar la variabilidad entre bloques experimentales y de la parcela dentro del bloque ( $Parcela_{l(k)}$ ) para capturar las variaciones no controladas a nivel de parcela. Finalmente, el termino de error residual representa la variabilidad no explicada por los demás factores, asumiendo que sigue una distribución normal con media cero y varianza constante.

### 3.3.1 Variables de estudio

Las variables fueron escogidas por su relevancia en los procesos fisiológicos de las plantas, el funcionamiento del ecosistema y como indicadores de la fertilidad del suelo (Cuadro 1). En conjunto, estas variables permiten caracterizar integralmente la influencia del aprovechamiento forestal sobre las propiedades del suelo.

**Cuadro 1.** Descripción de las variables medidas.

Variable	Unidad	Importancia
Nitrógeno (N)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)	Esencial para el crecimiento vegetal y el desarrollo de la biomasa.
Fósforo (P)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)	Fundamental para el desarrollo de raíces y procesos metabólicos de las plantas; su disponibilidad influye en la productividad del ecosistema.
Potasio (K)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)	Importante para la resistencia de las plantas, la regulación hídrica y la fotosíntesis.
Conductividad eléctrica (CE)	Decisiemens por metro (dS/m).	Refleja la concentración de sales en el suelo; influye en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiológica.
Potencial de Hidrogeno (pH)	Escala de 0 a 14	Regula la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana en el suelo; valores extremos pueden afectar la biodiversidad del ecosistema.
Actividad microbiana (AM)	Miligramos de carbono por kilogramo de suelo (mg/kg)	Indica la cantidad y actividad de microorganismos en el suelo, esenciales para la descomposición de materia orgánica, reciclaje de nutrientes y como indicador de fertilidad del suelo.

Se establecieron variables las cuales permitieron determinar algunos de los parámetros químicos fundamentales del suelo (Cuadro 2). La incorporación de sensores en la medición de estos parámetros permitió la obtención de datos en tiempo real y con un margen de error reducido, lo cual aumenta la precisión del análisis y la confiabilidad de la comparación entre los tratamientos evaluados.

**Cuadro 2.** Mediciones realizadas con los sensores.

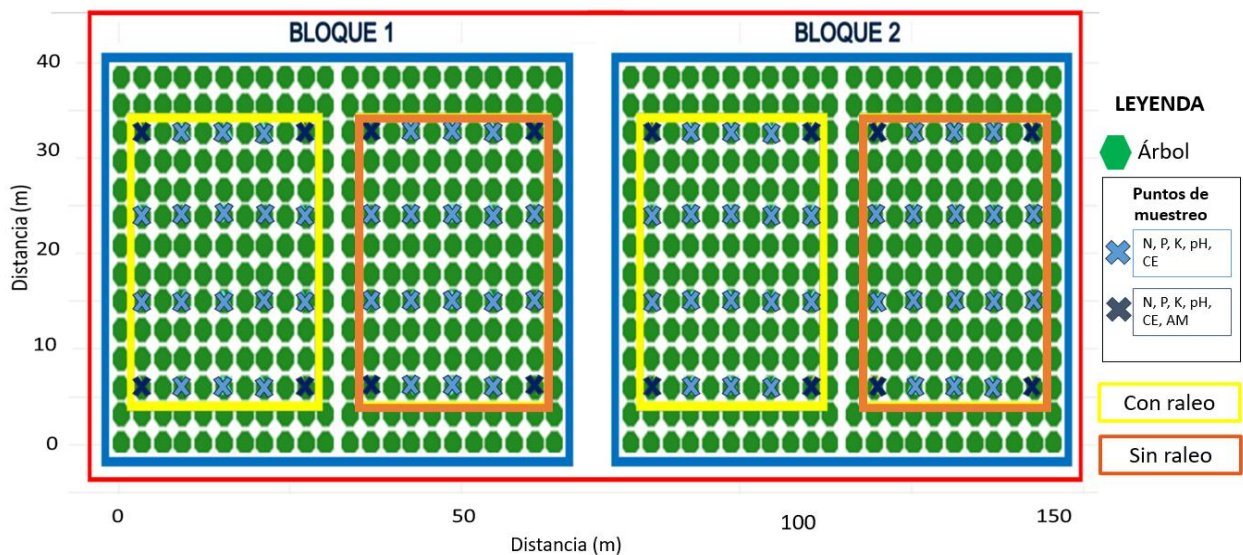
<b>Elemento</b>	<b>Unidad</b>
Nitrógeno (N)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)
Fósforo (P)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)
Potasio (K)	Miligramos por kilogramo (mg/kg)
Conductividad eléctrica (CE)	Decisiemens por metro (dS/m).
Potencial de Hidrogeno (pH)	Escala de 0 a 14

### 3.3.2 Puntos y tiempos de muestreo

Se realizó una distribución de los puntos mediante un muestreo sistemático. El muestreo sistemático tiene la ventaja de que no hace falta disponer de un marco elaborado, puede aplicarse en la mayoría de las situaciones, la única precaución que debe tenerse en cuenta es comprobar que la característica que estudiamos no tenga una periodicidad que coincida con la del muestreo (Tamayo, 2000).

La toma de datos se realizó en tres momentos clave; dos muestreos antes, uno durante y dos después del aprovechamiento. Esto con el objetivo de obtener datos confiables para la estimación de las variables de estudio.

Para la evaluación de N, P, K, CE y pH se establecieron puntos de muestreos fijos, donde la plantación presenta un distanciamiento de 3 m x 3 m entre plantas y filas, permitiendo así realizar una cuadrícula regular sobre la plantación forestal a un distanciamiento de 6 m x 9 m (Figura 3), cada punto de muestreo se tomó a 30 cm de cada árbol; lo que permitió evaluar la variabilidad espacial de manera uniforme dentro de cada bloque. Se obtuvieron 20 puntos de muestreo por tratamiento y un total de 80 puntos de muestreo en toda la plantación. Para la georreferenciación de los puntos se usó un GPS de alta precisión; esto permitió la comparación entre momentos temporales dentro de la plantación.



**Figura 3.** Gráfico de puntos de muestreo de las variables a evaluar.

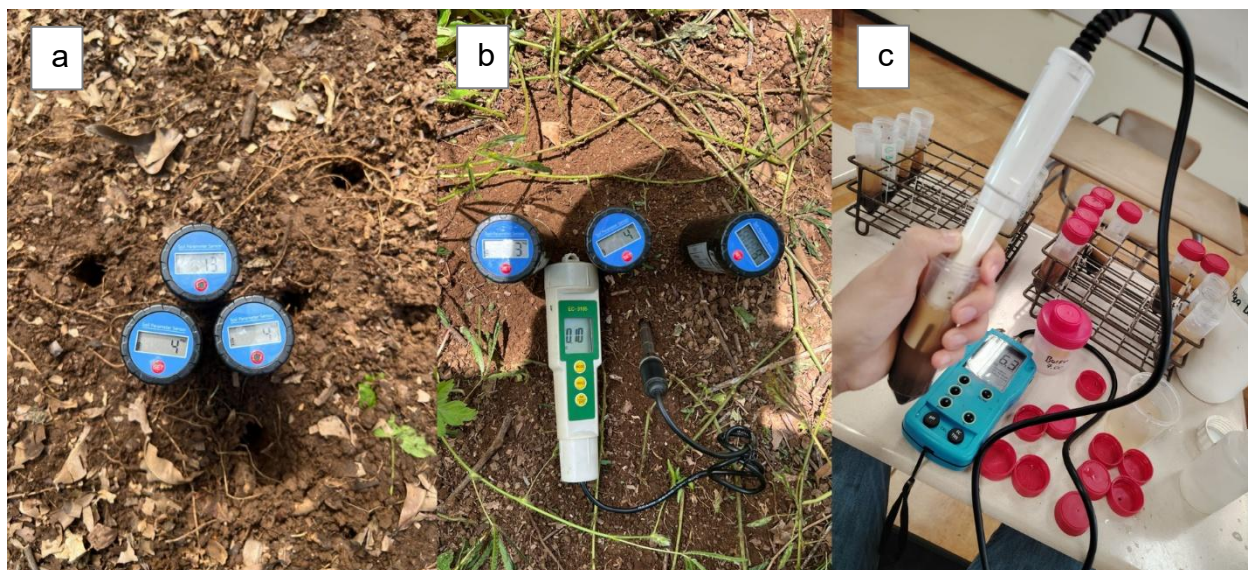
La recolección de las muestras de suelo se realizó mediante la técnica de muestreo compuesto; el cual se refiere a la muestra de suelo obtenida de varias extracciones o muestras simples, reunidas en un recipiente y luego bien mezcladas, de donde se retira 1 kg de suelo para ser llevada a laboratorio (Mendoza & Espinoza, 2017). Para este proyecto se tomaron cinco submuestras de suelo por punto de muestreo, lo cual permitió obtener una muestra homogénea, se identificó con la información necesaria y se llevó al Laboratorio de Suelos y Aguas de la universidad EARTH; el cual se encargó de realizar y brindar los resultados del Análisis de Suelos Regular y la Actividad Microbiana del suelo.

### 3.3.3 Medición de nitrógeno, fósforo y potasio

La determinación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) se realizó mediante el uso de sensores portátiles específicos para cada nutriente (Zerodis Soil Tester Digital Soil Test Kit for NPK) el cual según el fabricante estos presentan un grado de error menor al 2 % (Figura 4a).

Las mediciones se realizaron en campo, aprovechando la portabilidad y facilidad de uso de los dispositivos. Previamente a cada medición, se delimitó un área circular de aproximadamente 15 cm de diámetro, situada a una distancia de 30 cm de la base del árbol, permitiendo así insertar de manera cuidadosa los sensores, evitando cualquier objeto duro como piedras y raíces.

Una vez encendido el sensor proporcionó de manera inmediata la lectura de la concentración del nutriente, expresada en miligramos del nutriente sobre kilogramo de suelo (mg/kg). Con el fin de preservar la precisión de las mediciones, después de cada punto de muestreo se realizó la limpieza del electrodo del sensor con la ayuda de un pañuelo seco, esto para eliminar cualquier partícula de suelo que pudiera generar errores en la lectura.



**Figura 4.** Toma de datos con sensores. a) Sensores para medición de N, P, K. b) Sensor para medición de la conductividad eléctrica. c) Sensor para medición de pH.

### 3.3.4 Medición de pH

Para llevar a cabo la medición de pH y Conductividad eléctrica se utilizó un sensor (Hanna Instruments™ Sonda de pH/EC/TDS multiparámetros) el cual cuenta con sensores integrados para pH y CE en una sola estructura (Figura 4b y 4c).

En primer lugar, se tomaron muestras compuestas de suelo en los puntos específicos, con la ayuda de un barreno cilíndrico se tomaron cinco muestreos en forma de cruz y a una profundidad de 30 cm para poder obtener muestras representativas por punto de muestreo, luego se homogenizaron todas las muestras y se sacó una única muestra, una vez preparada se tomaron aproximadamente 20 g de suelo seco y se colocaron en un tubo cónico para centrifuga, posteriormente se le añadieron 20 mL de agua destilada, estableciendo una relación suelo: agua de 1:1. La muestra fue agitada de forma manual para garantizar una adecuada suspensión de partículas, luego se dejó en reposo para que los sedimentos se depositaran en el fondo y se obtuviera una fase líquida más clara para la medición.

Antes de la medición se realizó una calibración del equipo utilizando una solución tampón de pH 7, seguidamente se procedió a introducir cuidadosamente la sonda en la suspensión, asegurándose de que quedara completamente sumergida en la fase líquida, sin tocar el fondo del recipiente ni los sedimentos acumulados, una vez estabilizados los valores, se registraron las lecturas. Después de cada medición se enjuagó el electrodo con agua destilada para eliminar residuos.

### 3.3.5 Medición de actividad microbiológica

Se realizó mediante la selección de muestras de suelo en cuatro puntos establecidos en cada tratamiento; siendo en total 16 puntos de muestreo, garantizando así un análisis integral de sus propiedades biológicas. Las muestras recolectadas se realizaron con la ayuda de una pala, escarbando la zona superficial a 30 cm de distancia desde la base del árbol, esto para obtener

una muestra de 300 g de suelo por punto de muestreo que posteriormente se enviaron al laboratorio para realizarles un análisis de actividad microbiana, obteniendo como resultado miligramos de carbono por kilogramo de suelo (mg/kg).

### 3.3.6 Validación de las mediciones de campo

La diferencia observada entre las mediciones del sensor portátil y los resultados de laboratorio se calculó mediante la fórmula de error relativo (Ecuación 2), que indica cuanto se desvía una medición X con respecto a un valor de referencia Y en proporción a ese valor de referencia. Estudios usan esta métrica para evaluar la precisión de sensores de suelo, comparando mediciones de laboratorio con valores estándar (Li et al., 2019).

$$\text{Error relativo (\%)} = \left( \frac{\text{sensor-laboratorio}}{\text{laboratorio}} \right) * 100 \quad (2)$$

## 3.4 Análisis de datos

### 3.4.1 Interpolación inversa de la distancia (IDW)

Para el análisis de la distribución espacial de las propiedades edáficas se utilizó la técnica de interpolación inversa de la distancia (IDW) (Ecuación 3), la cual permite estimar valores en puntos no muestreados como un promedio ponderado de las observaciones cercanas, donde el peso asignado a cada valor disminuye con la distancia al cuadrado, este método ha demostrado ser una herramienta eficiente para la generación de mapas temáticos que representan la distribución espacial de variables edáficas clave (Montero, 2017).

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \cdot d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{ij}^{-p}} \quad (3)$$

Donde:  $Z_i$  representa el valor conocido en un punto de muestreo específico  $i$ , mientras que  $d_{ij}$  es la distancia euclidiana entre dicho punto  $i$  y el punto  $j$  donde se quiere estimar el valor. El exponente de ponderación  $p$ , que generalmente se establece en 2, determina la influencia relativa de la distancia en el peso asignado a cada punto, de manera que, a mayor distancia, menor es el peso considerado en la interpolación. Finalmente,  $N$  es el número de puntos vecinos que se incluyen en el cálculo para garantizar una estimación precisa y representativa.

## 4 Resultados

### 4.1 Análisis exploratorio de los datos

En general, se observaron efectos altamente significativos de Medición sobre la mayoría de las variables ( $p < 0.001$ ), mientras que el Manejo por sí solo no presentó efectos significativos ( $p > 0.05$ ), excepto en las interacciones mostradas más adelante (Anexo 1).

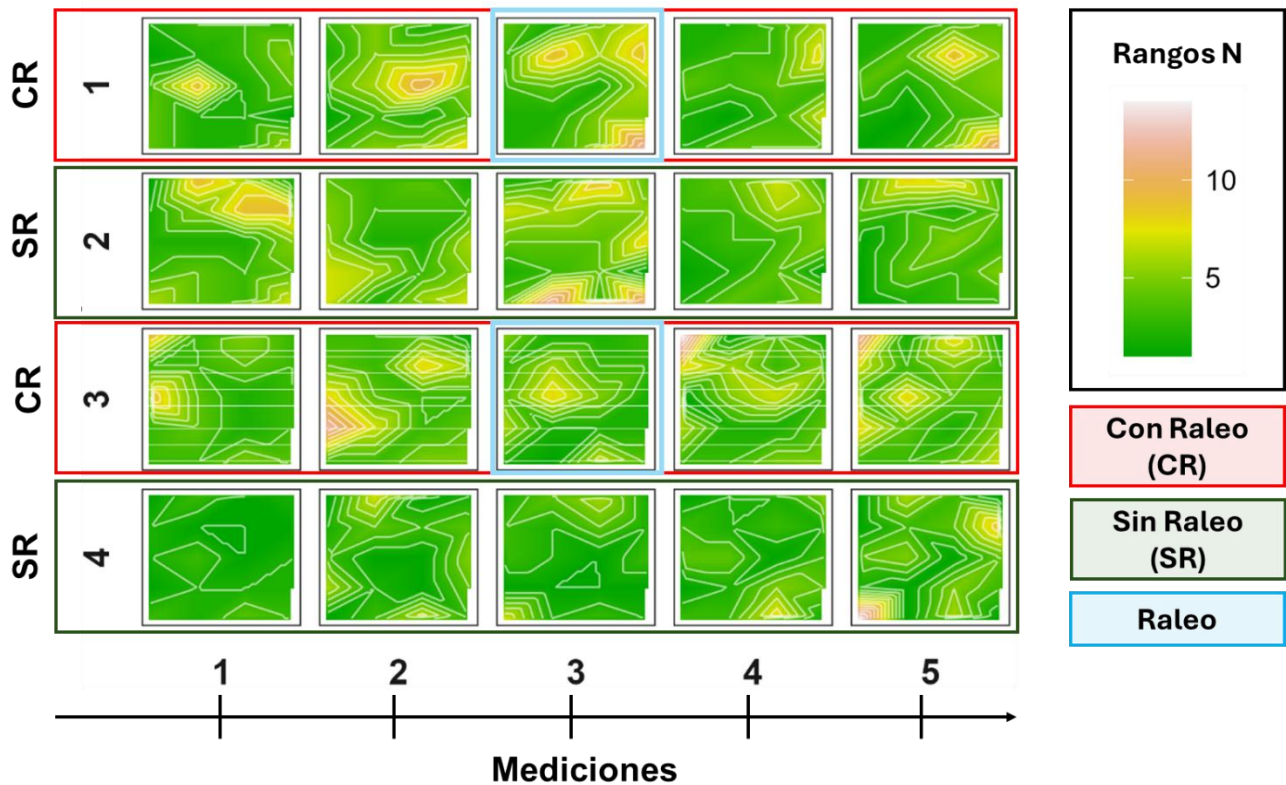
Para pH se observó un efecto significativo de la medición ( $F= 14.23$ ,  $p < 0.001$ ) y una interacción altamente significativa entre manejo y medición ( $F= 10.94$ ,  $p < 0.001$ ). Esto indica que la variación del pH a lo largo del tiempo dependió del tipo de manejo aplicado. El tratamiento sin raleo presentó una disminución marcada del pH en la medición M3, mientras que el tratamiento con raleo mantuvo valores más estables durante el período de estudio (Anexo 3c). En conductividad eléctrica (CE), los efectos de la medición fueron altamente significativos ( $F= 61.72$ ,  $p < 0.0012$ ). Esto evidencia diferencias temporales entre tratamientos, observándose un incremento pronunciado de CE en M3 en el tratamiento sin raleo (Anexo 3d). Para nitrógeno (N), no se observaron efectos significativos de ninguno de los factores ni de su interacción ( $p > 0.05$ ), mostrando estabilidad a lo largo de las mediciones (Anexo 2c). Para fósforo (P), el efecto de medición fue altamente significativo ( $F= 10.51$ ,  $p < 0.001$ ), sin efecto de manejo ni interacción, indicando cambios temporales independientes del tratamiento. Esto sugiere una dinámica temporal propia del P disponible, independientemente del manejo aplicado. En el caso de potasio (K), se obtuvo un efecto significativo de la medición ( $F = 14.54$ ,  $p < 0.001$ ), sin interacción ni efecto de manejo ( $p > 0.05$ ) indicando una variación temporal general del contenido de K. Finalmente, la Variable AM (Actividad microbiana) presentó efectos altamente significativos tanto de medición ( $F=122.96$ ,  $p < 0.001$ ) como de la interacción de manejo y medición ( $F= 21.27$ ,  $p < 0.001$ ), lo cual evidencia una fuerte respuesta temporal y dependiente del tratamiento (Anexo 3b).

El análisis de varianza se realizó utilizando un modelo lineal mixto con medias repetidas en el tiempo, verificando el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos. La normalidad de los residuos se verificó mediante gráficos Q-Q, observándose que los puntos se distribuyen aproximadamente sobre la línea diagonal, lo cual sugiere que se cumple el supuesto de normalidad (Anexo 4). Asimismo, la homogeneidad de varianzas se evaluó mediante inspección visual de los gráficos de residuos frente a valores ajustados (Anexo 5) sin observar patrones sistemáticos que indiquen heterocedasticidad. Por lo tanto, los supuestos del modelo se consideran razonablemente satisfechos.

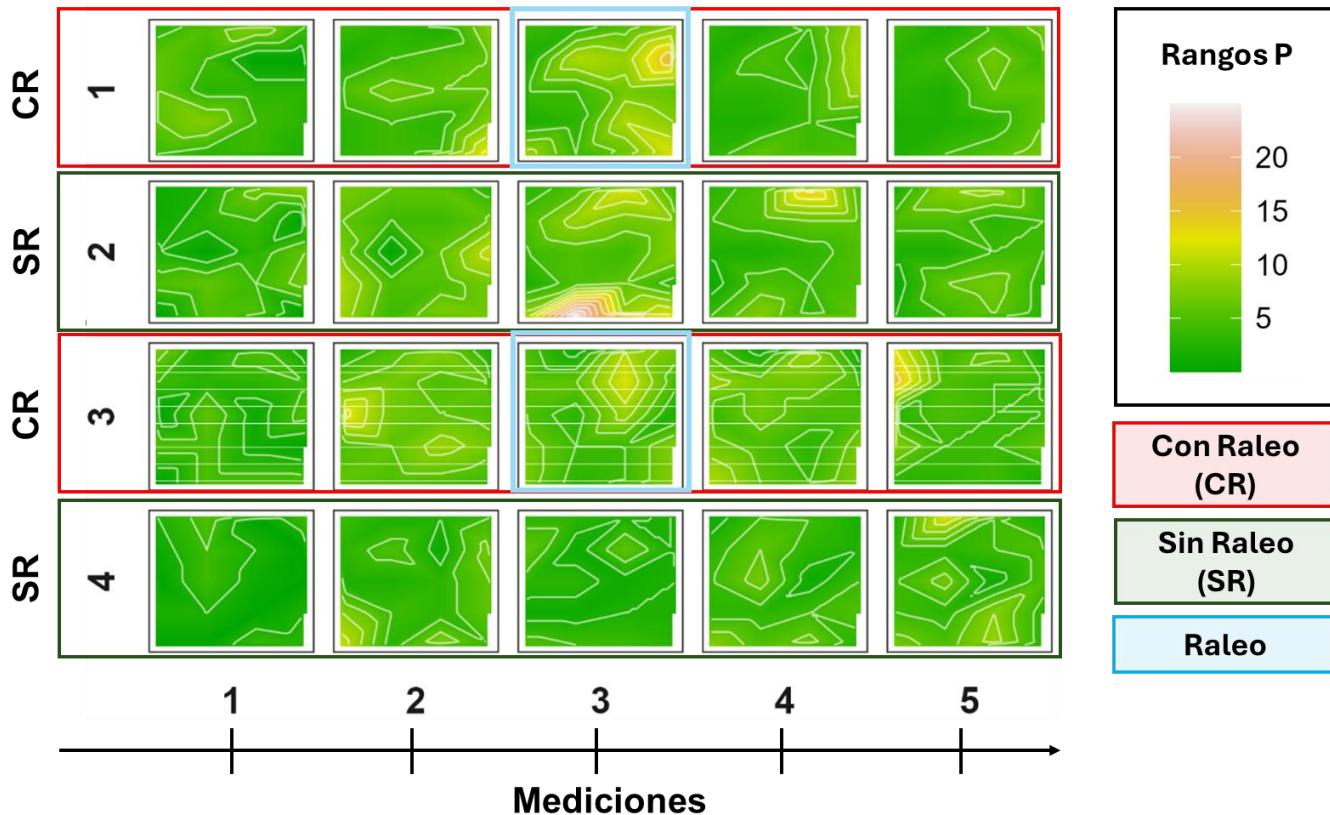
### 4.2 Análisis de variabilidad espacial y temporal

Se determinó la variabilidad espacial y temporal con interpolación inversa de la distancia (IDW) y por el promedio de interpolación de las propiedades químicas nitrógeno, fósforo, potasio, pH y conductividad eléctrica (Anexo 6) donde se utilizaron cinco mediciones y cuatro bloques experimentales.

Los valores promedio de interpolación de nitrógeno variaron entre los bloques y mediciones, destacando una mayor concentración en el manejo con raleo, específicamente en el bloque 1, medición 3 con un valor de 4.69 mg/kg; el bloque 3, medición 5 con un valor de 4.37 mg/kg en comparación con el manejo sin raleo en el bloque 2, medición 3 que presentó un valor de 5.10 mg/kg. Esta variabilidad sugiere una dinámica compleja de disponibilidad de nitrógeno influenciada por el manejo forestal del raleo, posiblemente a través de cambios en la cobertura vegetal y la actividad microbiana (Figura 5).

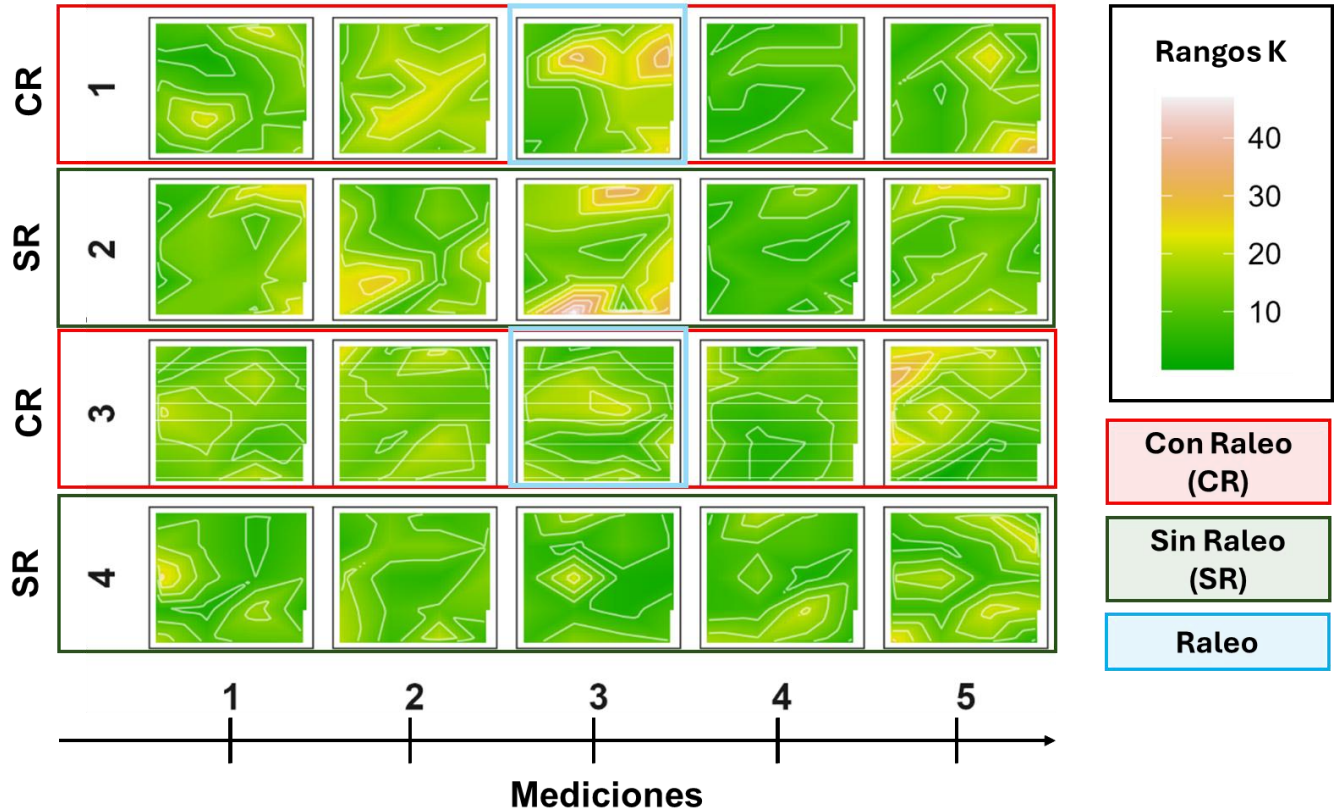


El fósforo mostró diferencias significativas en su distribución espacial, con valores promedio máximos en el manejo con raleo en la medición 3, bloque 1 con un valor de 6.77 mg/kg y valores menores y menos variables en el manejo sin raleo con datos de hasta 7.24 mg/kg en el bloque 2, medición 3. La heterogeneidad espacial muestra que el manejo, especialmente el raleo, impacta la distribución y acumulación de fósforo (Figura 6).

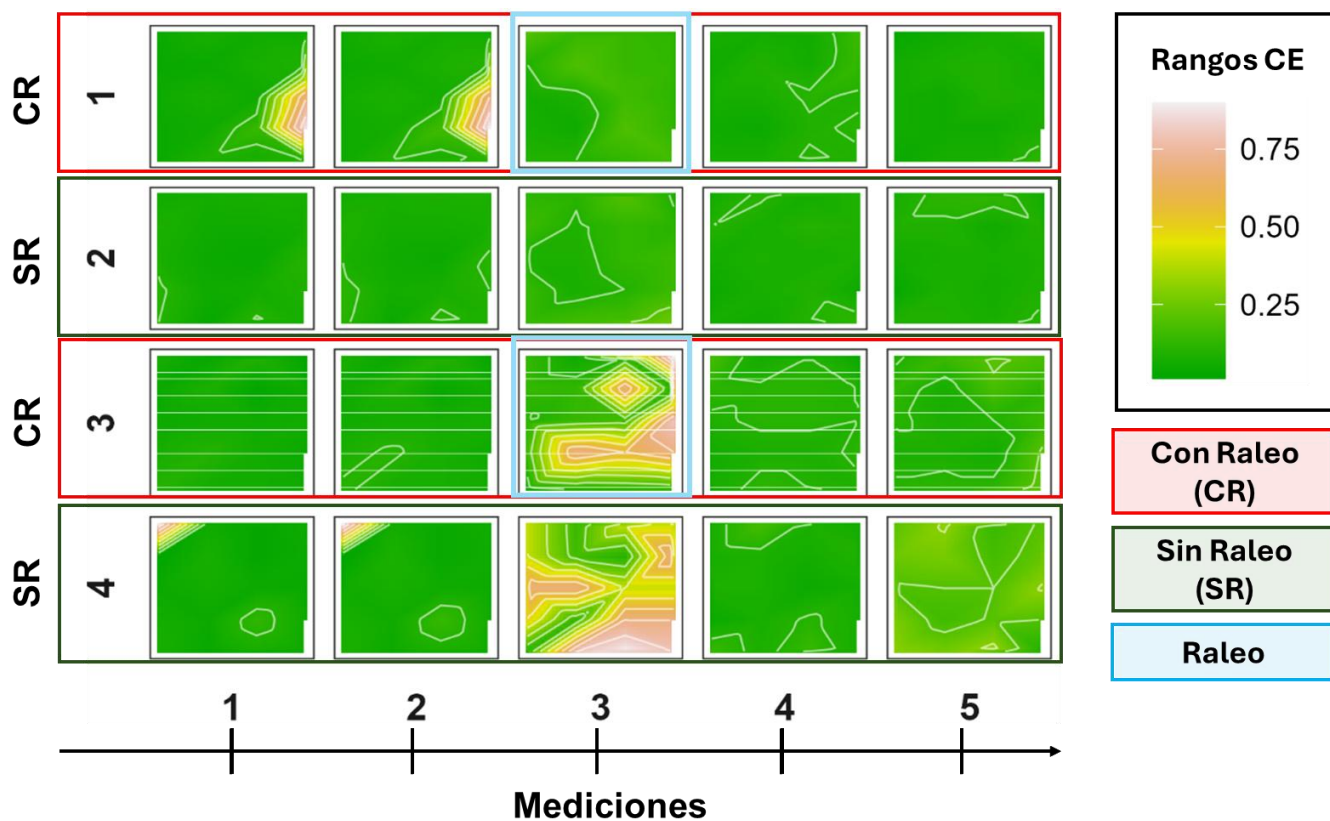


**Figura 6.** Distribución espacial del fósforo (P) en el suelo, estimada mediante interpolación.

Los mapas de interpolación de potasio indicaron valores fluctuantes entre los bloques y mediciones, con máximos de 16.57 mg/kg en el bloque 1, medición 2 en manejo con raleo, en comparación con el valor de 17.79 mg/kg en bloque 2, medición 3 del manejo sin raleo. Es así como la variabilidad espacial está estrechamente relacionada con el raleo y refleja procesos de redistribución de nutrientes (Figura 7).



Los valores promedio interpolados de la conductividad eléctrica presentaron variaciones moderadas entre los cinco momentos de medición y los cuatro bloques, bajo ambos manejos con raleo y sin raleo. Se observaron valores promedio de CE en bajo el manejo con raleo entre 0.067 dS/m y 0.127 dS/m, con un máximo en el bloque 3, medición 3 con un valor de 0.312 dS/m, y en el manejo sin raleo los valores se encuentran entre 0.061 dS/m y 0.446 dS/m, con un pico similar en el bloque 4, medición 3 con un valor de 0.446 dS/m. Estos picos indican concentraciones puntuales elevadas de sales que podrían deberse a la presencia localizada de nutrientes o las alteraciones inducidas por efectos edáficos (Figura 8).



**Figura 8.** Distribución espacial de Conductividad eléctrica (CE) en el suelo, estimada mediante interpolación.

El pH promedio interpolado se mantuvo dentro de un rango específico, siendo este de 5.12 en el bloque 4, medición 3 bajo el manejo sin raleo, hasta 6.50 en el bloque 2, medición 2 bajo el manejo sin raleo. Se presentó una heterogeneidad espacial característica de estos suelos aluviales, siendo modulada por la influencia del aprovechamiento forestal (Figura 9).

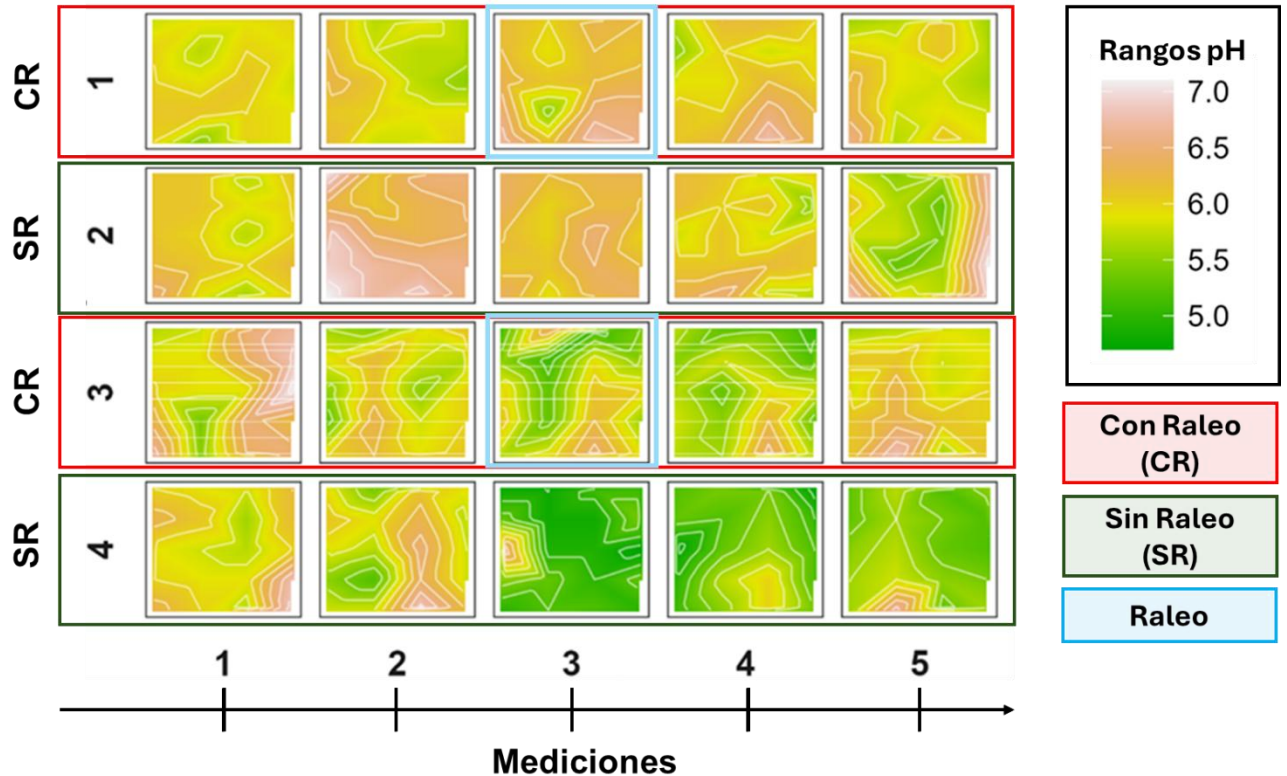


Figura 9. Distribución espacial del pH en el suelo, estimada mediante interpolación.

#### 4.3 Análisis de correlación de las variables físicas y microbiológicas

Para las variables de nitrógeno, fósforo, potasio, conductividad eléctrica, pH y actividad microbiana se obtuvo un cuadro de Pearson, en el cual se obtuvieron los datos de correlación (Anexo 7 y 8), y así mismo se obtuvo el p-valor para cada una de las variables en la correlación (Anexo 9 y 10).

La correlación de las variables bajo el manejo sin raleo muestra distintos resultados tanto en la correlación como en el p-valor, en la variable nitrógeno muestra correlaciones positivas y significativas con fósforo ( $r = 0.589$ ,  $p < 0.001$ ) y potasio ( $r = 0.618$ ,  $p < 0.001$ ), así mismo las correlaciones entre fósforo y potasio también son altas ( $r = 0.589$ ,  $p < 0.001$ ), los cuales son valores superiores a los observados en el manejo con raleo, lo que indica una distribución más coordinada de nutrientes en suelos sin raleo.

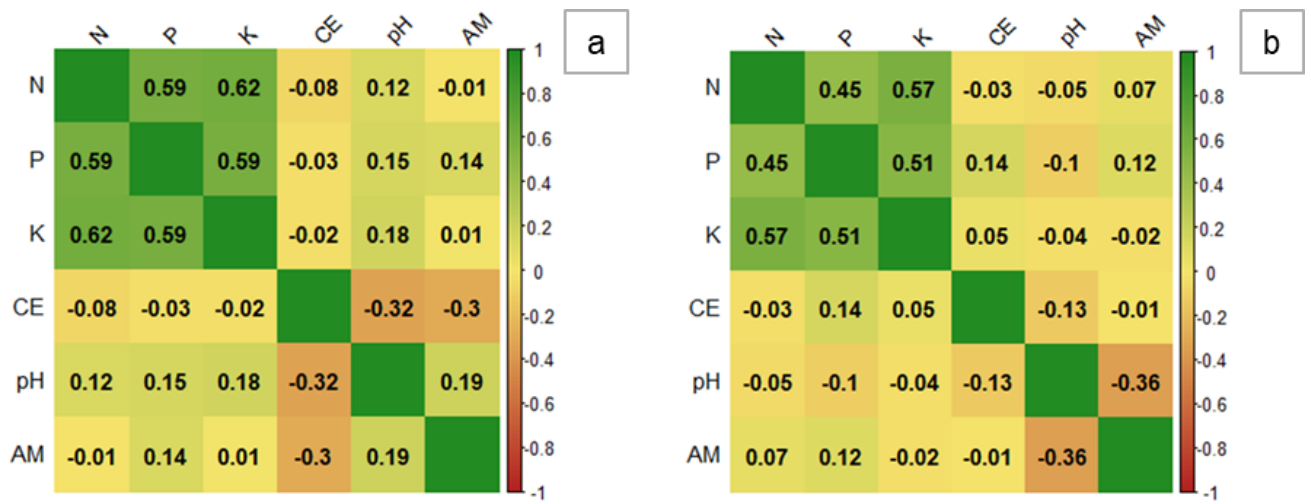
La conductividad eléctrica tiene correlaciones negativas y significativas con el pH ( $r = -0.324$ ,  $p < 0.001$ ), indicando que en el manejo sin raleo un pH más bajo se asocia con mayor concentración de sales solubles. Además, esta se correlaciona negativamente con la actividad microbiana ( $r = -0.298$ ,  $p < 0.001$ ), sugiriendo que condiciones altas de sales podrían limitar la actividad microbiana en suelos sin raleo.

El pH muestra correlaciones positivas y significativas con nitrógeno, fósforo y potasio, aunque de menor intensidad que las correlaciones positivas entre nutrientes, sugiriendo que un pH favorable en un manejo sin raleo está asociado con la disponibilidad de estos nutrientes. La actividad microbiana presenta correlaciones bajas y no significativas con nitrógeno, fósforo y potasio, pero si positiva con pH ( $r = 0.194$ ,  $p = 0.006$ ), indicando que, en ausencia de raleo, la actividad microbiana responde más favorablemente a un pH más cercano a neutro (Figura 10a).

En la correlación de las variables bajo el manejo con raleo muestran distintos resultados tanto en la correlación como en el p-valor, en el caso del nitrógeno y fósforo presentan una correlación positiva moderada ( $r = 0.448$ ,) y un  $p$  valor menor a  $< 0.001$ , indicando que áreas con mayor disponibilidad de nitrógeno también tienden a tener más fósforo, lo cual es consistente con procesos de mineralización asociados a la materia orgánica; el nitrógeno y potasio presentan una correlación fuerte ( $r = 0.565$ ) y un  $p$  valor menor a  $< 0.001$ , lo que sugiere una distribución espacial conjunta de estos nutrientes, posiblemente vinculada a la dinámica de nutrientes en respuesta al manejo de raleo; así mismo otras correlaciones entre nutrientes como el fósforo y potasio que presentan una correlación ( $r = 0.512$ ) y un  $p$  valor menor a  $< 0.001$  también reflejan una asociación positiva importante (Figura 10b).

En el caso de la conductividad eléctrica y fósforo se presenta una correlación débil ( $r = 0.142$ ) pero significativa ( $p = 0.045$ ), lo cual puede indicar que las zonas con mayor concentración de fósforo tienen también una ligera acumulación de sales solubles. Mientras que el pH no presenta correlaciones significativas con nitrógeno, fósforo o potasio ( $p > 0.1$ ), pero tiene una correlación negativa fuerte ( $r = -0.358$ ,  $p < 0.001$ ) y significativa con la actividad microbiana, sugiriendo que valores más bajos de pH favorecen a la actividad microbiana en el suelo tras el raleo.

La actividad microbiana presenta correlaciones débiles y no significativas con las variables químicas nitrógeno, fósforo, potasio y conductividad eléctrica, exceptuando el pH. Esto puede indicar que la microbiana responde principalmente a factores del pH más que a la concentración directa de nutrientes en el contexto del manejo con raleo.



**Figura 10.** Matriz de correlación de las variables en manejo. a) Correlación de las variables en manejo sin raleo. b) Correlación de las variables en manejo con raleo.

## 5 Discusión

### 5.1 Variación de las propiedades químicas y microbiológicas del suelo

Los resultados del ANDEVA indicaron que el factor de manejo no mostró diferencias significativas en las propiedades del suelo analizadas, lo que muestra que la intervención por raleo no ocasionó cambios visibles en las condiciones edáficas generales durante el periodo de observación. Este resultado coincide con el señalado por Rodríguez-Rivera et al. (2018), quienes señalan que los efectos del manejo forestal sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo por lo general se manifiestan de manera gradual y dependen de la intensidad y de la frecuencia de intervención. Con respecto al factor de medición mostró ser determinante en la variación de las propiedades del suelo, evidenciando diferencias significativas entre los distintos niveles evaluados. Este patrón muestra la heterogeneidad espacial y temporal de los sistemas edáficos, donde las variaciones en contenido de humedad, textura, biota o procesos de mineralización influyen directamente en las propiedades químicas y microbiológicas (Brady & Weil, 2017). Sin embargo, la significancia de las interacciones de manejo y medición en pH, Conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (AM) sugieren que las practicas aplicadas sí modificaron la respuesta temporal del suelo en estos parámetros, probablemente debido a cambios localizados en la dinámica iónica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Según Barrow y Hartemink (2023), el pH regula la química del comportamiento del suelo, afectando la solubilidad de macro y micronutrientes, la carga superficial de los coloides y la estructura microbiana. La disminución de pH que se observa en el tratamiento sin raleo durante la medición 3, crea un entorno edáfico de mayor acidez lo que facilita la liberación de H<sup>+</sup> y el desplazamiento de otros cationes del complejo de intercambio, disminuyendo la Capacidad de Intercambio catiónica (CEC) y modificando la solubilidad de P y K (Barrow & Hartemink, 2023). La disponibilidad de nutrientes no solo está determinada por la reacción del suelo, sino también por la capacidad de la planta para absorberlos y que este efecto difiere según el ion y el tipo de suelo. El aumento de la CE registrada en la misma medición 3, indica una concentración de sales solubles que puede haber influido adicionalmente en la movilidad iónica y el estrés osmótico, lo cual coincide con la variabilidad observada en la actividad microbiana.

### 5.2 Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo entre áreas con raleo y áreas sin intervención.

El estudio de la variabilidad espacial y temporal de las propiedades edáficas bajo el manejo forestal de *Calophyllum brasiliense* presenta una alta heterogeneidad en la distribución de nutrientes y microorganismos, efecto el cual se atribuye tanto al tipo de manejo como a factores topográficos y climáticos. Santiago-Mejía et al. (2018) destacan que las prácticas de raleo y el uso previo del suelo intensifican la fragmentación espacial de parámetros químicos, lo cual incide directamente en la fertilidad y en el rendimiento de las plantaciones.

Los mapas de interpolación evidenciaron una mayor dispersión de los nutrientes bajo el manejo con raleo, coincidiendo con Pagani (2025) el cual menciona que los manejos diferenciados modifican la heterogeneidad espacial. Así mismo, estudios como el de Acevedo et al. (2008)

señalan que la aplicación de geoestadística, mediante semivariogramas y mapas de interpolación, permite identificar zonas de mayor concentración de nutrientes, ayudando en la planificación de manejos diferenciados para aumentar la productividad y sostenibilidad del suelo.

Estudios como el de Bhunia et al. (2018) demuestran que la disposición espacial de elementos como el fósforo y el potasio puede variar notablemente según el régimen de intervención que se le brinde al área, lo cual indica que afecta tanto la absorción por las plantas como de los ciclos de reciclaje edáfico. Así mismo Panday et al. (2019) establecen que los cambios temporales en propiedades como el caso de la materia orgánica y la actividad microbiana están fuertemente influenciados por la cobertura vegetal y la dinámica de manejo, especialmente en suelos tropicales sometidos a altas precipitaciones.

En general el manejo forestal mediante raleo genera alteraciones en la disponibilidad y distribución espacial de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, así como menciona Lal (2005) quien señala la importancia de la materia orgánica y cobertura vegetal en controlar la mineralización y redistribución de estos nutrientes en los suelos forestales tropicales.

### **5.3 Correlación de las variables químicas y microbiológicas del suelo entre áreas con raleo y sin raleo utilizando coeficientes de correlación.**

En la correlación de los datos se presenta una relación negativa entre pH y actividad microbiana observada bajo raleo y la respuesta positiva en suelos sin raleo, coincidiendo con Wang et al. (2024) quienes destacan que valores moderados de pH y conductividad eléctrica favorecen a la estabilidad microbiana y a la disponibilidad de nutrientes en los suelos, así mismos estudios sobre actividad microbiana en suelos forestales, como el de Álzate (2014), muestran que factores como el manejo y el pH influyen sensiblemente en la biomasa y respiración microbiana. Los valores de pH presentaron un rango ácido a neutro, con dispersión espacial moderada, coincidiendo con el comportamiento esperado en suelos tropicales aluviales y su influencia en procesos microbiológicos (Mora-Chacón et al., 2019).

De manera general en los resultados se observó un aumento en la variabilidad espacial del raleo lo cual muestra una fragmentación y heterogeneidad dinámica inducida por el manejo, lo cual se presenta en estudios relacionados al manejo forestal como el de Rodríguez-Rivera et al. (2018) quienes señalan que las intensidades inadecuadas del manejo forestal pueden deteriorar la estructura y la función del suelo, alterando nutrientes y actividad microbiológica.

## 6 Conclusiones

- El aprovechamiento forestal mediante el raleo en la plantación de *Calophyllum brasiliense* no generó variaciones significativas en las propiedades químicas y microbiológicas del suelo durante el periodo de evaluación, lo que sugiere que la intensidad y temporalidad de la intervención no fueron suficientes para alterar de forma detectable las condiciones generales del suelo. Sin embargo, las diferencias observadas entre momentos de medición reflejan la dinámica natural del suelo, influenciada por la variación espacial, los procesos de mineralización y la actividad biológica.
- Las interacciones entre manejo y medición evidenciaron modificaciones puntuales en parámetros como pH, conductividad eléctrica y actividad microbiana, indicando que el raleo puede inducir respuestas localizadas en la disponibilidad de nutrientes y la estructura microbiana del suelo. La variabilidad espacial detectada en áreas con raleo respalda la hipótesis de que las prácticas de manejo forestal contribuyen a una mayor heterogeneidad edáfica, asociada con cambios en la cobertura, la humedad y el contenido de materia orgánica.

## 7 Literatura Citada

- Acevedo, D., Álvarez, M., Hernández, H., Maldonado, M., Pérez, P., & Castro Brindis, C. (2008). Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Revista TERRA Latinoamericana*, 4(4), 521-532. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792008000400004&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792008000400004&script=sci_arttext)
- Alzate, J., & Campiño, D. (2014). *Actividad microbiana de suelos con manejo orgánico y convencional*. [Requisito para optar al título de Tecnólogo Químico, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/2ac67e2b-ec36-427e-b5cf-619a5508f617>
- Barrow, N. J., & Hartemink, A. E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487, 21–37. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Bhunja, G., Mierda, P., & Chattopadhyay, R. (2018). Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals Of Agrarian Science*, 16(4), 436-443. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1512188718300125>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Brown-Salazar, R. (2020). *Efectos del aprovechamiento forestal comunitario en un bosque húmedo de la costa norte de honduras*. <https://www.fao.org/4/xii/0861-b4.htm>
- Caicedo, C. (2009). *Aportes para el conocimiento de Aceite Maria (Calophyllum brasiliense Cambess) especie con uso agroforestación prioridad de conservación local en el corregimiento del bajo calima municipio de Buenaventura (Valle del Cauca)* [Trabajo de Grado, Universidad del Pacífico. Repositorio Digital Universidad del Pacífico. <https://repositorio.unipacifico.edu.co/handle/unipacifico/142>
- Cascante, A., & Estrada, A. (2001). Composición florística y estructura de un bosque húmedo. *Revista de Biología Tropical*, 49(1). [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442001000100020](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442001000100020)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *World reference base for soil resources 2014. international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bcdecec7-f45f-4dc5-beb1-97022d29fab4/content>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of the world's forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- Gallardo, A., & Maestre, F. (2008). Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. En F. T. Maestre, A. Escudero & A. Bonet (Eds.), *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*. Dykinson. [https://maestrelab.com/wp-content/uploads/2015/10/Cap\\_6\\_Gallardo-Maestre.pdf](https://maestrelab.com/wp-content/uploads/2015/10/Cap_6_Gallardo-Maestre.pdf)
- Gómez-González, S., Miranda, A., González, M., Zamorano-Elgueta, C., Urrutia-Jalabert, R., Hoyos-Santillán, J., Azócar, G., Carrasco, N., & Lara, A. (2024). *El impacto de las plantaciones forestales en los ecosistemas de Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)*. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-el-impacto-de-las-plantaciones-forestales-en-los-ecosistemas-de-chile/>

- Google Earth (s.f.) [Universidad EARTH] Recuperado 25 enero 2024, de <https://www.google.com/maps/@10.2198595,-83.5915167,183m/data=!3m1!1e3?hl=es>
- Hilal, A., Bangroo, S. A., Kirmani, N. A., Wani, J. A., Biswas, A., Bhat, M. I., Farooq, K., Bashir, O., & Shah, T. I. (2024). Geostatistical modeling—a tool for predictive soil mapping. En S. Lamine, P. S. Srivastava, A. Kayad, F. Muñoz-Arriola, & P. C. Pandey (Eds.), *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 389–418). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91068-2.00011-4>
- Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center.
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2023). Climatología histórica y actual de la región Huetar Atlántica. IMN.
- Koutika, L.-S., Matondo, R., Mabilia-Ngoma, A., Sogni Tchichelle, V., Toto, M., Madzoumbou, J.-C., Akana, J. A., Gomat, H. Y., Mankessi, F., Thongo Mbou, A., Matsoumbou, T., Diamesso, A., Saya, A. R., & Nzila, J. D. (2022). *Sustaining forest plantations for the United Nations' 2030 Agenda. Sustainability*, 14(21), 14624. <https://doi.org/10.3390/su142114624>
- Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 242-258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. & Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42(Supplement 1), S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Li, Y., Yang, Q., Chen, M., Wang, M., & Zhang, M. (2019). An ISE-based on-site soil nitrate nitrogen detection system. *Sensors*, 19(21), 4669. <https://doi.org/10.3390/s19214669>
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. RiUNA. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Montero, K. (2017). *Mapeo de suelos a nivel de finca utilizando sistemas de información geográfica y sensores remotos: Estudio de caso comparativo en Tierra Blanca, Cartago, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/12241>
- Mora-Chacón, J., Nakajima, S., Rojas, P., & Rojas, C. (2019). Efecto de la cobertura forestal sobre las características del suelo en la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos: un estudio de caso. *InterSedes*, 20, 208-227. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/41851>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2015). *Suelos y biodiversidad*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a5f11714-3d0b-47d9-a3e4-4aeb19fdad6a/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2024, 12 de abril). *FAO advierte: tres cuartas partes de los suelos en América Latina y el Caribe están en riesgo*. <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/suelos-en-riesgo/es>
- Pagani, A. (2025, 9 de julio). *Manejo sitio-específico de nutrientes: Experiencias de 12 años de aprendizaje* [Presentación de escrito]. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2025/07/manejo-sitio-especifico-de-nutrientes-experiencias-de-12-anos-de-aprendizaje-agustin-pagani.pdf>
- Panday, D., Ojha, R. B., Chalise, D., Das, S., & Twanabasu, B. (2019). Spatial variability of soil properties under different land use in the Dang district of Nepal. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1600460. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1600460>
- Rodríguez-Rivera, V., Zaragosa-López, K., Clark-Tapia, R., & Ramírez Santiago, R. (2023). Efecto del manejo forestal en las propiedades fisicoquímicas del suelo en Ixtlán de Juárez,

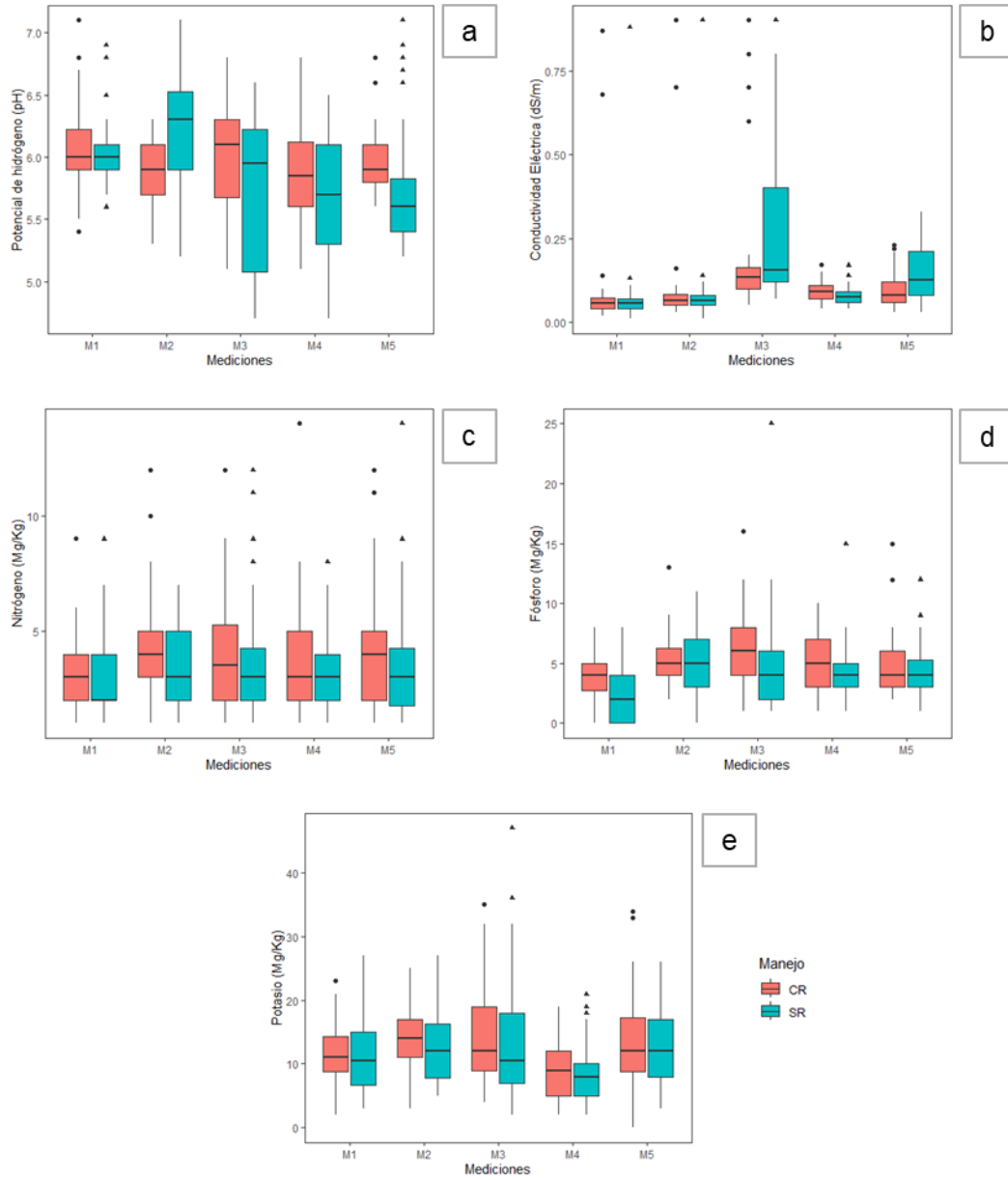
- Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 29(1), e2912476. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712023000100210&lng=pt&nrm=iso](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712023000100210&lng=pt&nrm=iso)
- Salas, G. (1987). *Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América Tropical*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.iica.int/items/31b87dde-f6ef-41e4-9ed9-2d67e991706c>
- Santiago, B., Martínez, M., Rubio, E., Vaquera, H., & Sánchez, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas lama-bordo en Oaxaca. *Revista TERRA Latinoamericana*, 5(2), 275-289. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-54722018000200275](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722018000200275)
- Sierra-Escobar, J. A., Castro-Restrepo, D., & Osório-Vega, W. (2012). Dependencia micorrizica de Barcino (Clusiaceae: *Calophyllum brasiliense* Cambers). *Actualidades Biológicas*, 34(97), 199–206. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14262>
- Tamayo, G. (2000). Diseños muestrales en la investigación. *Semestre Económico*, 4(7). <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1410>
- Tosi, J. A. (1969). Zonas de vida natural de Costa Rica. Editorial Tropical Science Center.
- Universidad EARTH. (2018). *Base de datos climáticos* [documento en Excel]. Guácimo (CR). Actualizado mensualmente.
- Vargas-Rojas, J. C., Vargas-Martínez, A., & Corrales-Brenes, E. (2023). Agricultural experiments with repeated measures over time: analysis strategies comparison. *Agronomía Mesoamericana*, 34(2). <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.52634>
- Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6). <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>

## 8 Anexos

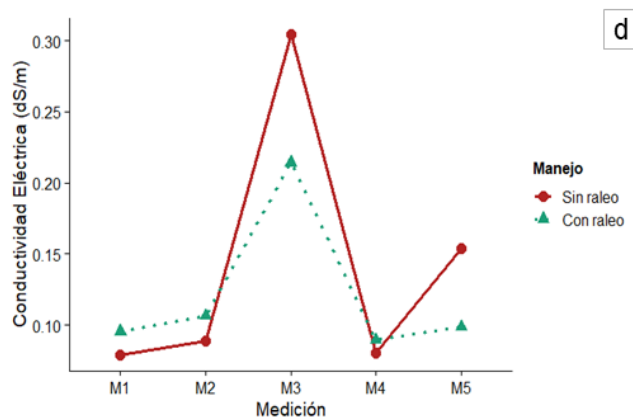
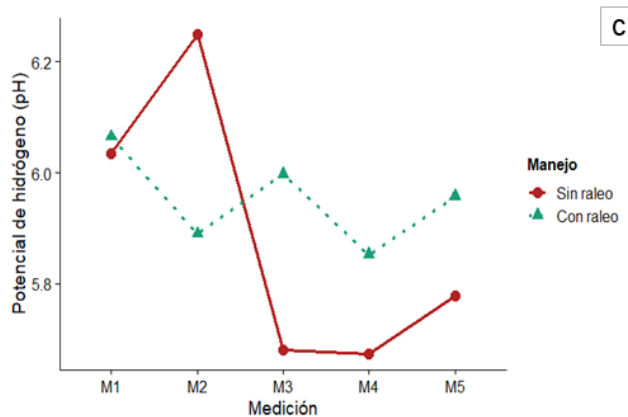
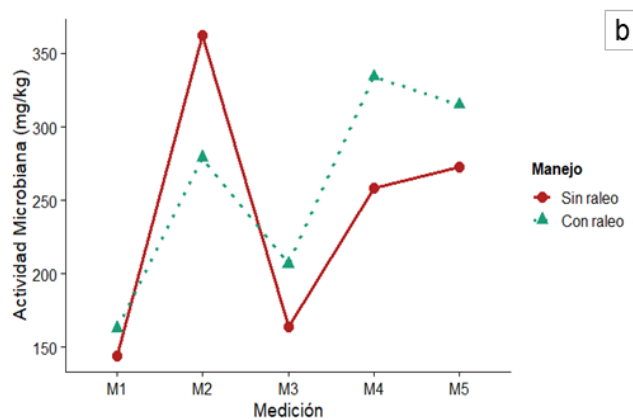
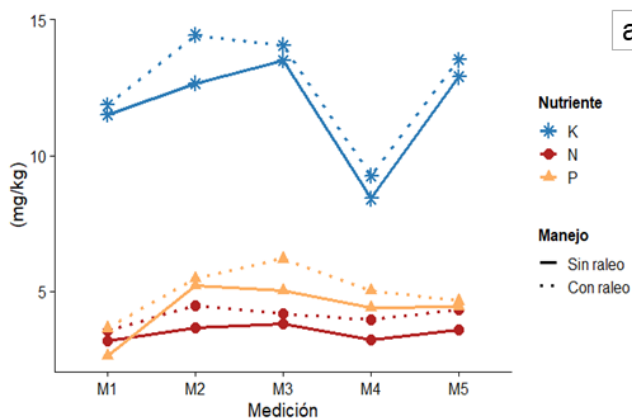
### Anexo 1. ANOVA de variables químicas y microbiológicas del suelo.

	SS	MS	Num DF	df	Fvalue	Pr(>F)	Var	Sig
Manejo	6.700934e+00	6.700934e+00	1	2.064274	1.26857319	3.739002e-01	N	ns
Medición	3.419286e+01	8.548214e+00	4	548.000000	1.61828725	1.681646e-01	N	ns
Manejo: Medición	4.542857e+00	1.135714e+00	4	548.000000	0.21500537	9.301002e-01	N	ns
Manejo1	6.342254e+00	6.342254e+00	1	2.051658	0.89363619	4.421148e-01	P	ns
Medicion1	2.984857e+02	7.462143e+01	4	548.000002	10.51430697	3.260350e-08	P	***
Manejo: Medición1	1.907143e+01	4.767857e+00	4	548.000002	0.67180051	6.117508e-01	P	ns
Manejo2	1.851172e+01	1.851172e+01	1	2.096610	0.47314985	5.597327e-01	K	ns
Medicion2	2.275546e+03	5.688866e+02	4	548.000001	14.54044594	2.707834e-11	K	***
Manejo: Medición2	2.556071e+01	6.390179e+00	4	548.000001	0.16332964	9.568640e-01	K	ns
Manejo3	2.503264e-03	2.503264e-03	1	2.015368	0.21260087	6.897173e-01	CE	ns
Medición3	2.906962e+00	7.267404e-01	4	548.000000	61.72168047	4.756123e-43	CE	***
Manejo: Medición3	2.148525e-01	5.371312e-02	4	548.000000	4.56182720	1.243728e-03	CE	**
Manejo4	7.003094e-03	7.003094e-03	1	2.004980	0.05294062	8.393675e-01	pH	ns
Medicion4	7.530679e+00	1.882670e+00	4	548.000000	14.23223661	4.642801e-11	pH	***
Manejo: Medición4	5.787964e+00	1.446991e+00	4	548.000000	10.93867922	1.536729e-08	pH	***
Manejo5	1.168606e+02	1.168606e+02	1	2.001066	0.02820829	8.820606e-01	AM	ns
Medicion5	2.037651e+06	5.094128e+05	4	548.000001	122.96417821	7.781939e-75	AM	***
Manejo: Medición5	3.524670e+05	8.811675e+04	4	548.000001	21.26998604	2.535040e-16	AM	***

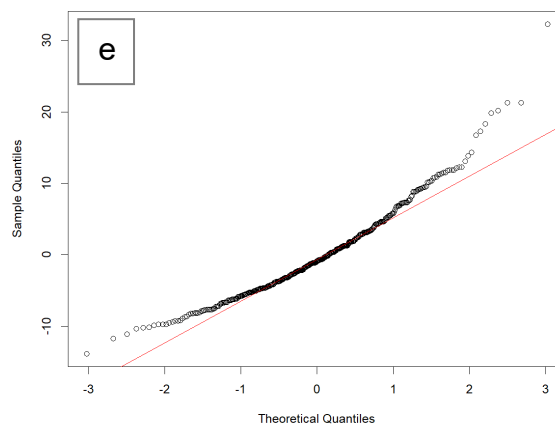
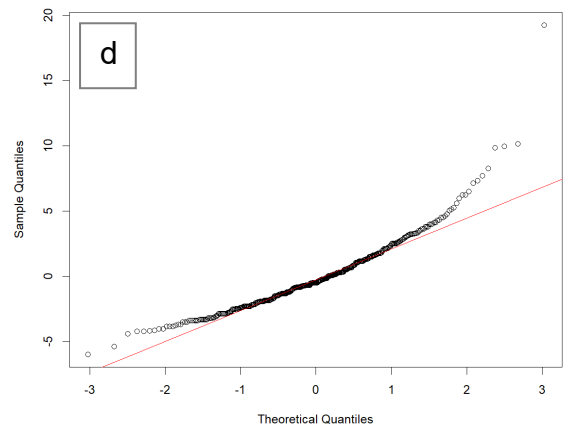
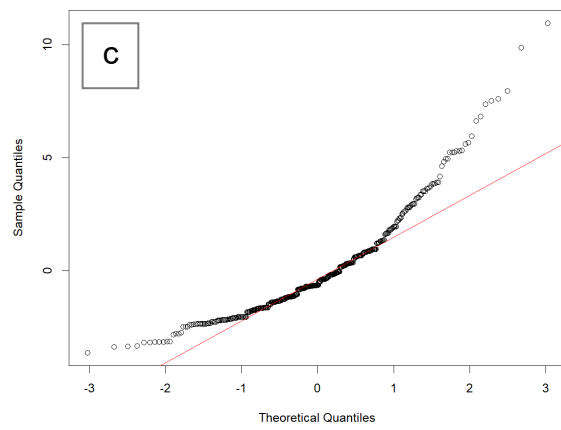
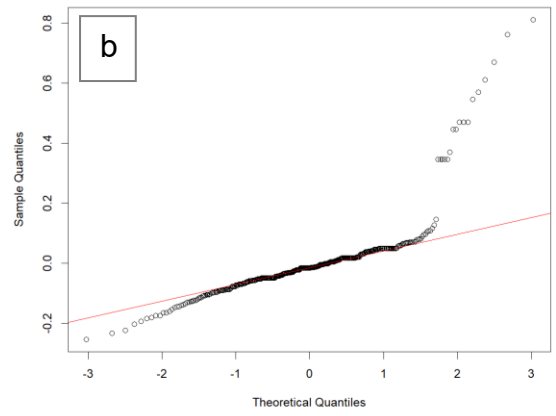
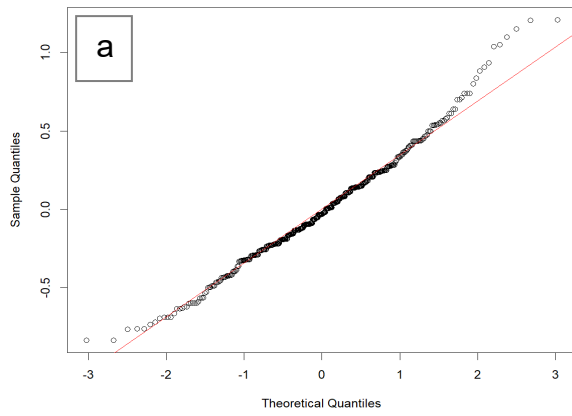
**Anexo 2.** a) Distribución de los datos de pH, b) Distribución de los datos de CE, c) Distribución de los datos de N, d) Distribución de los datos de P, e) Distribución de los datos de K.



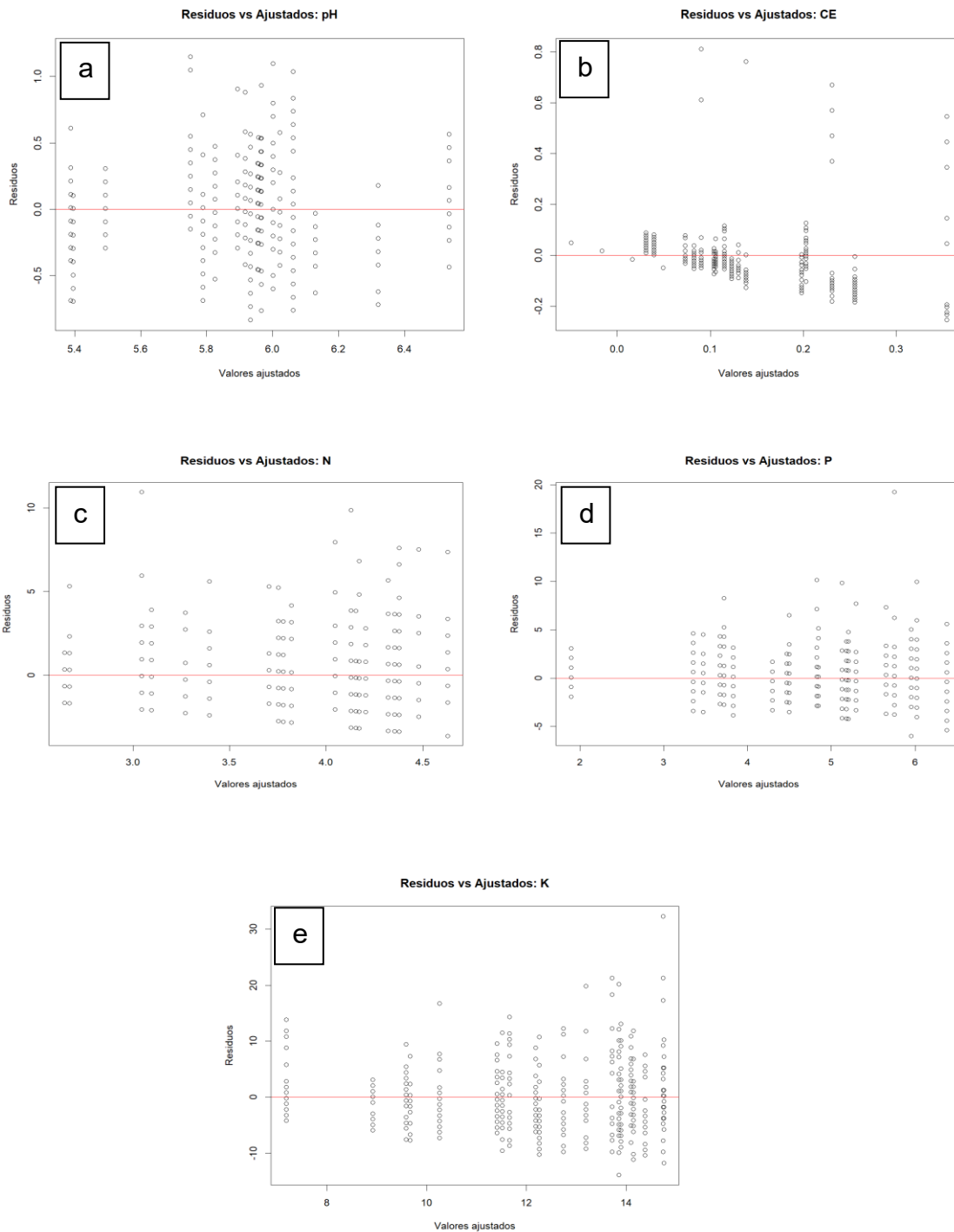
**Anexo 3.** Evolución temporal de las variables. a) Evolución temporal de N, P, K a través del tiempo, b) Evolución temporal de la actividad microbiana a través del tiempo, c) Evolución temporal del pH a través del tiempo, d) Evolución temporal de la conductividad eléctrica a través del tiempo.



**Anexo 4.** a) Normalidad de los residuos de pH, b) Normalidad de los residuos de CE, c) Normalidad de los residuos de N, d) Normalidad de los residuos de P, e) Normalidad de los residuos de K.



**Anexo 5.** a) Homogeneidad de la varianza de pH, b) Homogeneidad de la varianza de CE, c) Homogeneidad de la varianza de N, d) Homogeneidad de la varianza de P, e) Homogeneidad de la varianza de K.



**Anexo 6.** Resultados de análisis de correlación de las variables en el manejo con raleo.

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>	<b>AM</b>
N	1	0.44773983	0.56549531	-0.02731875	-0.04510855	0.06986414
P	0.44773983	1	0.51191215	0.14175916	-0.10378482	0.1181652
K	0.56549531	0.51191215	1	0.04649356	-0.0395277	-0.02248363
CE	-0.02731875	0.14175916	0.04649356	1	-0.13031012	-0.00910795
pH	-0.04510855	-0.10378482	-0.0395277	-0.13031012	1	-0.35849575
AM	0.06986414	0.1181652	-0.02248363	-0.00910795	-0.35849575	1

**Anexo 7.** Resultados de análisis de correlación de las variables en el manejo sin raleo.

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>	<b>AM</b>
N	1	0.58899511	0.61835775	-0.07989148	0.12229125	-0.01106998
P	0.58899511	1	0.58870387	-0.02717426	0.14663497	0.13501954
K	0.61835775	0.58870387	1	-0.02162031	0.17766433	0.01223241
CE	-0.07989148	-0.02717426	-0.02162031	1	-0.32424517	-0.29800348
pH	0.12229125	0.14663497	0.17766433	-0.32424517	1	0.19413381
AM	-0.01106998	0.13501954	0.01223241	-0.29800348	0.19413381	1

**Anexo 8.** Resultados del *P* valor de la correlación en las variables del manejo con raleo.

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>	<b>AM</b>
N	0*	2.98e-11*	2.68e-18*	0.701	0.526	0.326
P	2.98e-11*	0*	9.38e-15*	0.0452*	0.144	0.0956
K	2.68e-18*	9.38e-15*	0*	0.513	0.578	0.752
CE	0.701	0.0452*	0.513	0*	0.0659	0.898
pH	0.526	0.144	0.578	0.0659	0*	1.86e-07*
AM	0.326	0.0956	0.752	0.898	1.86e-07*	0*

**Anexo 9.** Resultados del *P* valor de la correlación en las variables del manejo sin raleo.

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>	<b>AM</b>
N	0*	4.58e-20*	1.74e-22*	0.261	0.0845	0.876
P	4.58e-20*	0*	4.83e-20*	0.702	0.0383*	0.0566
K	1.74e-22*	4.83e-20*	0*	0.761	0.0118*	0.864
CE	0.261	0.702	0.761	0*	2.81e-06*	1.82e-05*
pH	0.0845	0.0383*	0.0118*	2.81e-06*	0*	0.00588*
AM	0.876	0.0566	0.864	1.82e-05*	0.00588*	0*

**Anexo 10.** Resultados del promedio de la interpolación.

<b>Bloque</b>	<b>Manejo</b>	<b>Medición</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>pH</b>	<b>CE</b>
1	CR	1	3.06697156	4.12396025	11.0562703	5.93237924	0.11443421
1	CR	2	4.55993148	4.70172942	16.5707645	5.89029201	0.12634191
1	CR	3	4.68794231	6.77420581	16.1262773	6.18573621	0.12785911
1	CR	4	3.32733169	4.19506531	7.7564924	6.08175356	0.08005607
1	CR	5	3.65461966	3.96615705	11.5105613	5.91101805	0.06752317
2	SR	1	4.47514464	3.47083784	13.1670263	5.99901036	0.0613429
2	SR	2	3.96002894	5.6661033	13.4835829	6.50215596	0.07134187
2	SR	3	5.09680077	7.23915072	17.7933015	6.21630095	0.12219942
2	SR	4	3.51759105	4.91960673	7.61036889	6.01470844	0.07770243
2	SR	5	3.59706873	4.59495348	13.3782038	5.87075408	0.07991069
3	CR	1	3.61002979	3.18631984	12.8484764	6.1394352	0.06013424
3	CR	2	4.55537335	6.13671893	13.4056376	5.92092249	0.06838476
3	CR	3	3.54054747	5.7199923	12.7505326	5.72893227	0.31252683
3	CR	4	4.11957591	5.65799748	9.57544966	5.66716994	0.09612566
3	CR	5	4.37329978	4.84047915	14.5282468	6.03309741	0.11780931
4	SR	1	1.818441	1.67141971	9.713678	5.98699257	0.06549954
4	SR	2	2.80988738	3.99179417	10.6963165	5.94187268	0.07522783
4	SR	3	2.39444537	2.51550207	7.80066409	5.12315283	0.44682242
4	SR	4	2.84452438	3.89126419	9.85471735	5.39295559	0.08144846
4	SR	5	3.59539851	4.62712797	12.3194274	5.53202728	0.22181194