



UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente.

Carrera de Agronomía

Tema:

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO EN ÁREAS DE PRODUCCIÓN DE CEREALES, BAJO LA INFLUENCIA DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES, EN SANTA FE.

Proyecto de Investigación previo a la obtención de título de Ingeniero Agrónomo, otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Carrera de Agronomía.

Autores:

Jefferson Jessiel Bayas Tiñe
Luis Fernando Sánchez Morejón

Tutor:

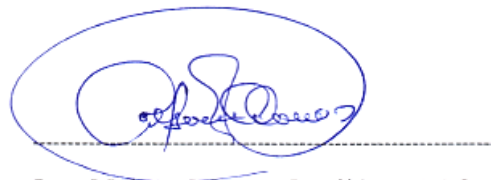
Ing. Nelson Monar Gavilánez M.Sc.

Guaranda – Ecuador

2025

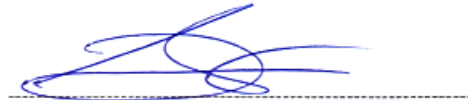
CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO EN ÁREAS DE PRODUCCIÓN DE CEREALES, BAJO LA INFLUENCIA DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES, EN SANTA FE.

REVISADO Y APROBADO POR:

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a blue oval. The signature is written over a horizontal dashed line.

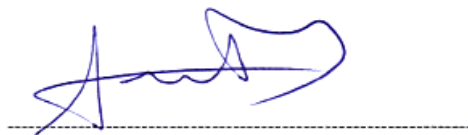
Ing. Nelson Monar Gavilánez M.Sc.

TUTOR

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal dashed line.

Ing. David Rodrigo Silva García Mg.

DOCENTE LECTOR

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal dashed line.

Dra. Andrea Román Ramos

DOCENTE LECTORA

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Jefferson Jessiel Bayas Tiñe, con CI 2150203632 y Luis Fernando Sánchez Morejón, con 0250308632, declaramos que el trabajo y los resultados presentados en este informe no han sido previamente presentados para ningún grado o calificación profesional; y, que las referencias bibliográficas que se incluye han sido consultadas y citadas con su respectivo autor(es).

La Universidad Estatal de Bolívar, puede hacer uso de los derechos de publicación correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, su Reglamentación y la Normativa Institucional vigente.



Jefferson Jessiel Bayas Tiñe

C.I. 2150203632

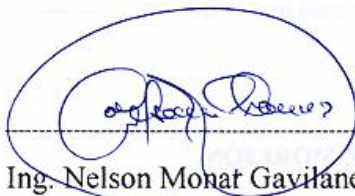
AUTOR



Luis Fernando Sánchez Morejón

C.I. 0250308632

AUTOR



Ing. Nelson Monat Gavilanez M.Sc.

C.I. 0201089836

TUTOR



DOCTORA MSc. GINA CLAVIJO CARRION
Notaria Cuarta del Cantón Guaranda.

ESCRITURA N° 20250201004P00458

DECLARACIÓN JURAMENTADA

OTORGAN:

LUIS FERNANDO SANCHEZ MOREJÓN Y
JEFFERSON JESSIEL BAYAS TIÑE

CUANTÍA: INDETERMINADA

Di 2 COPIAS

P.A.

En el Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, República del Ecuador, hoy martes a los veintisiete días del mes de mayo del año dos mil veinticinco, ante mí **DOCTORA MSc. GINA LUCIA CLAVIJO CARRION, NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA**, comparecen con plena capacidad, libertad y conocimiento, a la celebración de la presente escritura, los señores **LUIS FERNANDO SANCHEZ MOREJÓN Y JEFFERSON JESSIEL BAYAS TIÑE**, por sus propios y personales derechos en calidad de OTORGANTES. Los comparecientes declaran ser de nacionalidad ecuatorianas, mayores de edad, de estado civil solteros, de ocupación estudiantes ambas partes, domiciliado el primero en la parroquia La Asunción, cantón Chimbo y de paso por este cantón Guaranda, Provincia Bolívar, con celular número cero nueve nueve siete uno seis tres cero tres cero y con correo electrónico luisfsanchez@mailes.ueb.edu.ec; y el segundo en la parroquia Guanujo, cantón Guaranda, Provincia Bolívar, con celular número cero nueve seis ocho dos uno nueve seis tres; y, con correo electrónico jefbayas@mailes.ueb.edu.ec, hábiles en derecho para contratar y contraer obligaciones, a quienes de conocer doy fe, en virtud de haberme exhibido sus documentos de identificación, en base a los cuales obtengo las certificaciones biométricas del Registro Civil, además por petición expresa de los compareciente se adjuntan sus documentos personales como son sus cédulas de ciudadanía y certificados de votación, mismos que agrego a esta escritura como documentos habilitantes. Advertidos los comparecientes por mí la Notaría de los efectos y resultados de esta escritura, así como examinados que fueron en forma aislada y separada de que comparecen al otorgamiento de esta escritura sin coacción, amenazas, temor reverencial, ni promesa o seducción instruidas por mí de la obligación que tienen de decir la verdad con claridad y exactitud; y, advertidas sobre la gravedad del juramento y de las penas de perjurio, me solicitan que recepte su declaración juramentada: Nosotros: **LUIS FERNANDO SANCHEZ MOREJÓN Y JEFFERSON JESSIEL BAYAS TIÑE**, declaramos bajo juramento que los criterios e ideas emitidos en el presente proyecto de investigación, es de nuestra absoluta autoría, titulado: **CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO EN ÁREAS DE PRODUCCIÓN DE CEREALES, BAJO LA INFLUENCIA DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES, EN SANTA FE**. Autorizamos a la Universidad Estatal de Bolívar hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o parte de lo que contiene la obra, con fines estrictamente académicos o de investigación expuestos en el mismo. En el proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingenieros Agrónomos, otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar, a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente. Para su celebración y otorgamiento se observaron los preceptos de ley que el caso requiere; y, leída que les fue a las comparecientes íntegramente por mí la Notaría, aquellas se afirman y ratifican en la aceptación de todas sus partes y firman junto conmigo en unidad de acto, incorporándose al protocolo de esta Notaría, la presente declaración juramentada, de todo lo cual doy Fe. -----

SR. LUIS FERNANDO SANCHEZ MOREJÓN

C.C. 0250308032

SR. JEFFERSON JESSIEL BAYAS TIÑE.

C.C. 2150203632

DOCTORA MSc. GINA CLAVIJO CARRION
NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA.



Jefferson Jessiel Bayas Tiñe Luis Fernando Sánche...

BAYAS_SANCHÉZ_PROYECTO_DE_TITULACIÓN_SUELOS.pdf

 David Silva

 David Silva

 Universidad Estatal de Bolívar

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::3117:462392733

101 Páginas

Fecha de entrega
26 may 2025, 2:43 p.m. GMT-5

23.205 Palabras

Fecha de descarga
26 may 2025, 3:28 p.m. GMT-5

114.965 Caracteres

Nombre de archivo
BAYAS_SANCHÉZ_PROYECTO_DE_TITULACIÓN_SUELOS.pdf

Tamaño de archivo
6.1 MB



Ing. Nelson Monar Gavilanez M.Sc.
TUTOR

6% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.




Filtered from the Report

- Submitted works
- Internet sources

Exclusions

- 1 Excluded Source

Top Sources

- 0%  Internet sources
- 6%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



Ing. Nelson Monar Gaviláñez M.Sc.
TUTOR

DEDICATORIA

A Dios, el arquitecto de mi destino, quien con infinita sabiduría ha trazado cada sendero de mi vida. "Jeremías 29:11", "Porque yo sé los planes que tengo para ustedes, planes de bienestar y no de calamidad, a fin de darles un futuro y una esperanza". Su amor y su guía han sido la brújula que me ha orientado en los momentos de duda, y su misericordia, la fortaleza que me ha sostenido en cada adversidad. A Él, entrego cada esfuerzo y cada meta cumplida.

A la Universidad, ese segundo hogar, templo del conocimiento donde mi mente se ha expandido y mis sueños han tomado forma. Como menciona Paulo Coelho en "El alquimista", "Cuando quieres algo, todo el universo conspira para que realices tu deseo", y este lugar ha sido el escenario donde mis anhelos han encontrado camino. A mis docentes, mentores y guías, que, con paciencia y entrega, sembraron en mí el conocimiento, verdaderos guardianes del saber, mi eterno agradecimiento por enseñarme que el aprendizaje no tiene límites y que la educación es la llave que abre las puertas del futuro.

A mi familia, el pilar más firme en mi vida, cuyo amor incondicional ha sido mi mayor fortaleza. A mis padres; Angel Bayas y María Tiñe, por su esfuerzo incansable y sus sacrificios silenciosos, que hoy dan frutos en cada paso que doy. A mis hermanos; Blanca, Miriam, Ana y William, por su apoyo constante y por recordarme siempre de dónde vengo, sin ustedes, este camino habría sido mucho más difícil.

A mis amistades, cómplices de risas, aventuras y también de batallas compartidas. En cada momento de incertidumbre y en cada desafío académico, su apoyo ha sido un faro de esperanza. A aquellos que se han convertido en mi familia elegida, gracias por estar siempre, por motivarme y por hacer de este viaje una experiencia inolvidable. Cada página escrita en mi historia lleva un pedazo de ustedes, y cada éxito alcanzado también es suyo.

Jefferson Jessiel Bayas Tiñe

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación quiero dedicar a Dios por haberme guiado y llenado de suficiente sabiduría, salud y vida para llegar a culminar esta parte ultima mi carrera de estudio.

A mi madre Dolores Janneth Sánchez Morejón quien fue padre y madre en este proceso siempre apoyándome en nunca rendirme en mi formación. Tu bendición que a diario de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien gracias Madre mía por siempre estar apoyándome y confiar en mí. Te Amo.

A mi tía Piedad y esposo que siempre estuvo con sus consejos que fueron un pilar fundamental todo el tiempo de mi estudio para poder lograrlo su confianza y su apoyo incondicional para no rendirme en ningún momento. A mi prima Jenny por sus palabras de aliento para persistir en cada paso cada día de mi formación y que con sacrificio y dedicación de llegar a la meta. A mi Tío Carlos por siempre apoyarme con sus palabras sabias de que nunca llegar nada fácil sino con dedicación y sacrificio en cada uno de los desafíos que nos presenta la vida.

A mi abuelita María por haber sido fundamental con sus consejos y su impulso de verme llegar a cumplir mis metas.

A toda mi familia por sus palabras sabias y confianza para seguir adelante en cada proceso de mi formación profesional, gracias por confiar en mí.

Luis Fernando Sánchez Morejón

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a Dios por habernos otorgado sabiduría, bienestar físico y existencia. Extendemos también nuestro reconocimiento a nuestros progenitores, pilares fundamentales en la consecución de nuestras metas y anhelos, quienes han contribuido de manera significativa al desarrollo integral de nuestras vidas. Este logro ha sido posible gracias al apoyo de cada uno de ustedes.

Agradecemos a la Universidad Estatal de Bolívar por habernos brindado el espacio institucional propicio para nuestra formación académica y por permitirnos forjar vínculos interpersonales que permanecerán en nuestra memoria. Manifestamos nuestro especial agradecimiento al Ing. Nelson Monar, quien, mediante su acompañamiento pedagógico, experiencia profesional y constante disposición, contribuyó significativamente al esclarecimiento de nuestras inquietudes durante el proceso investigativo. De manera destacada, extendemos nuestra gratitud al Ing. Eduardo Rodríguez, cuya orientación experta y conocimientos excepcionales fueron fundamentales para el desarrollo riguroso de este trabajo. Asimismo, agradecemos a la Dra. Andrea Román e Ing. David Silva por su valiosa intervención como lectores del presente estudio, cuyas observaciones, sugerencias y críticas constructivas, aportaron al fortalecimiento de nuestras competencias investigativas.

Nuestros más sinceros agradecimientos al proyecto UEB-FIASA por el respaldo técnico, económico y científico brindado en cada etapa del desarrollo de esta investigación. De igual manera, reconozco y valoro el apoyo constante de los técnicos: Junior, Katy, Rocío y Nervo, cuya disposición y orientación fueron fundamentales para resolver nuestras inquietudes y guiarnos a lo largo del proceso.

A nuestros queridos amigos/as, gracias por ser luz en los días difíciles y alegría en los momentos de triunfo. Su cariño, apoyo y fe en nosotros fueron el impulso que necesitábamos para seguir adelante, este logro también les pertenece.

Jefferson & Luis

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pág.
CAPÍTULO I.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Caracterización del suelo.....	6
2.2. Concepto de suelo	6
2.3. Clasificación por su categoría de uso	7
2.3.1. Clase I.....	7
2.3.2. Clase II	7
2.3.3. Clase III.....	7
2.3.4. Clase IV.....	7
2.3.5. Clase V	8
2.3.6. Clase VI.....	8
2.3.7. Clase VII	8
2.3.8. Clase VIII	8
2.4. Taxonomía del suelo	8
2.4.1. Entisol.....	9
2.4.2. Inceptisol	9
2.4.3. Mollisol	9
2.5. Propiedades físicas del suelo.....	10
2.5.1. Textura	10
2.5.2. Penetrabilidad.....	10
2.6. Propiedades químicas del suelo.....	11
2.6.1. pH.....	11

2.6.2.	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	11
2.6.3.	Macronutrientes esenciales.....	12
2.7.	Cobertura vegetal	12
2.7.1.	Barbecho.....	12
2.7.2.	Cultivos y pastos	13
2.7.3.	Quema reciente.....	13
2.7.4.	Vegetación natural primaria	13
2.7.5.	Vegetación natural secundaria.....	14
2.7.6.	Causas y consecuencias de la pérdida de la cobertura vegetal.....	14
2.8.	Erosión eólica.....	15
2.9.	Erosión hídrica	15
2.10.	Tipos de degradación del suelo	15
2.10.1.	Química	15
2.10.2.	Física	15
2.11.	Manejo sustentable del recurso suelo.....	16
2.12.	Enmienda del suelo	16
2.12.1.	Enmiendas orgánicas.....	16
2.13.	Manejo nutricional del cultivo de trigo	17
2.13.1.	Requerimientos Nutricionales	17
2.13.2.	Efecto de la deficiencia de nutrientes en el cultivo del trigo.....	17
2.14.	Grilla de muestreo	19
CAPÍTULO III.....		20
3.	MARCO METODOLÓGICO	20
3.1.	Ubicación y caracterización de la investigación.	20
	• Situación geográfica y Edafoclimática.....	20
	• Zona de vida	20
3.2.	Metodología	20
3.2.1.	Material en estudio	20
3.2.2.	Factores en estudio	20
3.2.3.	Tratamientos.....	21
3.2.4.	Tipo de diseño experimental o estadístico	21
3.2.5.	Manejo de experimento	21

3.2.6. Métodos de evaluación (variables respuestas)	22
3.2.7. Análisis de datos.....	24
CAPÍTULO IV	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1. Interpretación de resultados.....	25
4.1.1. Estado de las propiedades físico-químicas del suelo.....	25
4.1.2. Estado de las propiedades físicas de los suelos productivos	30
4.1.3. Estado de las propiedades químicas de los suelos productivos.....	33
4.1.4. Recomendaciones del plan de fertilización para el cultivo de trigo.....	42
4.2. Comprobación de la hipótesis	47
CAPÍTULO V	48
5.1. CONCLUSIONES	48
5.2. RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

N°	Detalle	Pág
1.	Análisis de la distribución espacial de las propiedades químicas	25
2.	Análisis de la distribución espacial del pH	27
3.	Análisis de la distribución espacial de los niveles de compactación	28
4.	Análisis de la distribución espacial de la relación catiónica Ca/Mg	28
5.	Análisis de la distribución espacial de la relación catiónica Ca+Mg/K	29
6.	Análisis de la influencia del tipo de cobertura vegetal sobre las propiedades físicas del suelo	30
7.	Análisis de la influencia del tipo de cobertura vegetal sobre las propiedades químicas del suelo	33
8.	Primera recomendación de uso de fertilizantes comerciales	42
9.	Segunda recomendación de uso de fertilizantes comerciales	43
10.	Tercera recomendación de uso de fertilizantes comerciales	44
11.	Cuarta recomendación de uso de fertilizantes comerciales	45
12.	Quinta recomendación de uso de fertilizantes comerciales	46

ÍNDICE DE FIGURAS

N°	Detalle	Pág
1.	Medias de la compactación del suelo (MPa) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	30
2.	Medias de la temperatura del suelo (°C) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	31
3.	Medias del contenido de nitrógeno total (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	34
4.	Medias del contenido de fósforo (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	35
5.	Medias del contenido de potasio (meq/100g) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	36
6.	Medias del contenido de cobre (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	37
7.	Medias del contenido de hierro (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	38
8.	Medias del contenido de manganeso (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal	39
9.	Medias de la relación Ca+Mg/K influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	40
10.	Medias del contenido de materia orgánica influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo	41

ÍNDICE DE ANEXOS

N°	Detalle
1.	Mapa de ubicación de la investigación.
2.	Croquis de la distribución espacial en el territorio.
3.	Bases de datos.
4.	Fotografías.
5.	Categorías establecidas para cada parámetro físico-químico.
6.	Mapas de las características físico-químicas del suelo.
6.1	Mapa de compactación.
6.2	Mapas de disponibilidad de materia orgánica.
6.3	Mapa del pH.
6.4	Mapa de disponibilidad de Nitrógeno.
6.5	Mapa de disponibilidad de Fósforo.
6.6	Mapa de disponibilidad de Potasio.
6.7	Mapa de disponibilidad de Calcio.
6.8	Mapa de disponibilidad de Magnesio.
6.9	Mapa de disponibilidad de Boro.
6.10	Mapa de la relación Calcio y Magnesio.
6.11	Mapa de la relación Magnesio y Potasio.
6.12	Mapa de la relación Calcio, Magnesio y Potasio.
6.13	Mapa de disponibilidad de Manganeseo.
6.14	Mapa de disponibilidad de Hierro.
6.15	Mapa de disponibilidad de Zinc.
6.16	Mapa de disponibilidad de cobre.
7.	Glosario de términos técnicos.

RESUMEN

La agricultura constituye la principal actividad económica de la provincia de Bolívar, destacándose la parroquia Santa Fe por contar con la mayor superficie destinada a la producción de cereales, particularmente trigo y maíz. A pesar de las condiciones agroecológicas favorables, en los últimos años se ha observado una disminución en la productividad del trigo. Esta situación se ha atribuido al deterioro físico y químico del suelo, derivado de la actividad antrópica, la reducción de la cobertura vegetal y la implementación de prácticas agrícolas inadecuadas. Ante este contexto, los objetivos de la presente investigación fueron: (i) evaluar el estado actual de las propiedades físico-químicas del suelo, (ii) comparar dichas propiedades según el tipo de cobertura vegetal dominante, y (iii) proponer un plan de fertilización sostenible. Para ello, se aplicó un muestreo estratificado en zonas con historial de siembra continua de trigo en rotación con maíz. En cada sitio se recolectaron 10 submuestras compuestas a una profundidad de 0 a 20 cm. Las variables analizadas incluyeron: pH (método electrométrico), materia orgánica (volumétrico), textura (método de Bouyoucos), contenido de nitrógeno y fósforo (colorimetría), y concentración de potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, cobre y zinc (espectrofotometría de absorción atómica). El análisis estadístico se realizó mediante modelos lineales generalizados y mixtos, con separación de medias mediante la prueba LSD de Fisher ($p < 0,05$). Los resultados evidenciaron una interacción compleja entre las propiedades edáficas, el tipo de cobertura vegetal y las prácticas de manejo agrícola. Se observó que niveles elevados de nitrógeno se relacionaron con una mayor acumulación de materia orgánica, mientras que en áreas de producción cerealera con alta intervención antrópica y laboreo intensivo, los niveles fueron de medios a bajos. El fósforo presentó una acumulación significativa en el 71 % de la superficie muestreada, atribuida al uso excesivo de fertilizantes fosfatados. Aunque los suelos son de origen volcánico, el potasio se encuentra desbalanceado, probablemente como consecuencia de prácticas de manejo inadecuadas. El calcio y el magnesio mostraron concentraciones de medias a altas, aunque su disponibilidad está influenciada por su forma química y la competencia iónica. Respecto a los micronutrientes, se detectaron concentraciones elevadas de zinc, hierro y manganeso en áreas con alto contenido de materia orgánica. La materia orgánica fue mayor en zonas con vegetación natural primaria, y significativamente menor en áreas degradadas por el monocultivo, la quema de residuos y la remoción del rastrojo. El pH fue predominantemente neutro en zonas de cultivo intensivo y ácido en áreas con cobertura vegetal densa. Además, se identificaron condiciones de alta compactación del suelo, baja infiltración y elevada temperatura superficial en suelos intervenidos, lo cual afecta negativamente el desarrollo de los cultivos.

Palabras clave: macronutrientes, micronutrientes, quema de residuos, pastos, trigo, maíz, producción.

SUMMARY

Agriculture is the main economic activity in the province of Bolívar, with the parish of Santa Fe standing out for having the largest area dedicated to cereal production, particularly wheat and maize. Despite favorable agroecological conditions, a decline in wheat productivity has been observed in recent years. This reduction is attributed to the physical and chemical degradation of the soil, resulting from anthropogenic activities, decreased vegetation cover, and inadequate agricultural practices. In this context, the objectives of the present study were to: (i) assess the current status of the soil's physicochemical properties, (ii) compare these properties based on the dominant vegetation cover, and (iii) propose a sustainable fertilization plan. A stratified sampling design was applied in areas with a history of continuous wheat cultivation in rotation with maize. At each site, 10 composite subsamples were collected at a depth of 0–20 cm. The variables analyzed included: pH (electrometric method), organic matter (volumetric method), texture (Bouyoucos method), nitrogen and phosphorus content (colorimetry), and concentrations of potassium, calcium, magnesium, iron, manganese, copper, and zinc (atomic absorption spectrophotometry). Data analysis was conducted using generalized and mixed linear models, with mean separation by Fisher's LSD test ($p < 0.05$). The results revealed a complex interaction between edaphic factors, vegetation cover type, and agricultural management practices. High nitrogen levels were associated with greater organic matter accumulation, whereas medium to low levels were observed in cereal-producing areas subject to intense anthropogenic activity and tillage. Phosphorus accumulation was detected in 71% of the sampled area, due to the excessive application of phosphate fertilizers. Although the soils are of volcanic origin, potassium levels were found to be imbalanced, attributed to inappropriate management practices. Calcium and magnesium levels ranged from medium to high, although their availability is influenced by chemical form and ionic competition. As for micronutrients, elevated concentrations of zinc, iron, and manganese were detected in areas with high organic matter content. Organic matter was higher in zones with primary natural vegetation and significantly lower in areas degraded by monoculture, residue burning, and stubble removal. Soil pH tended to be neutral in intensively cultivated areas and acidic in zones with dense vegetation cover. Additionally, high soil compaction, low infiltration rates, and elevated surface temperatures were identified in disturbed areas, adversely affecting crop development.

Key words: macronutrients, micronutrients, residue burning, pasture, wheat, corn, production.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El suelo es una mezcla de materiales parentales como rocas, minerales originarios y orgánicos; capaz de soportar la vida vegetal. El interés del estudio del suelo se centra en evaluar la salud, la determinación de las propiedades físicas y químicas, además, los cambios que se relacionan con las operaciones de producción que alteran la cobertura vegetal original (Altamirando, 2019).

En la provincia Bolívar, el 92% de la superficie corresponde a suelos de ladera, de los cuales el 45% se encuentran en procesos de erosión crítica, debido principalmente al uso inadecuado de las prácticas agropecuarias, condiciones climáticas y edáficas de la zona. Los sistemas de producción agrícola de la parroquia Santa Fe están dominados por los cereales, especialmente el maíz suave, trigo y cebada, los que se maneja bajo monocultivo y en plantaciones consecutivas que se repiten año con año, operando siempre por la costumbre en el manejo de la preparación del suelo y la nutrición (Chela, 2018).

La degradación del suelo, es la pérdida de su utilidad actual o potencial, que implica cambios adversos del suelo en su capacidad inherente para producir bienes y servicios. Por acciones directas de origen antrópicas la productividad agrícola se degrada, reduciendo la calidad del suelo y sus propiedades, ya que la alteración química disminuye la cantidad de nutrientes esenciales para las plantas, aumentando la acidificación y/o salinidad del suelo (Pachés, 2020).

Remover el suelo con la maquinaria agrícola, genera compactación, lo cual reduce la cantidad de oxígeno en el suelo, por consecuencia, afecta la microbiología del suelo, lo que, en el tiempo, disminuye la fertilidad de la tierra e incrementando la presencia de plagas y enfermedades (Guamán et al., 2023).

La estabilidad de los ecosistemas terrestres depende en gran medida de la diversidad y composición de especies de su cubierta vegetal. Mantener cubierta la superficie del suelo es un principio fundamental en la agricultura de conservación (Armada, 2015)

La labranza de conservación es un sistema de laboreo con características especiales en el que al menos un 30% de residuos de cosecha anterior permanecen en el suelo. La siembra directa beneficia en la reducción de erosión, degradación del suelo, el aumento de materia orgánica y la actividad microbiana del suelo (Cabrera, 2022)

La fertilidad física, es la capacidad del suelo para proporcionar a las plantas un entorno que suministre agua y nutrientes a las raíces, proporcione oxígeno, y permita un buen desarrollo de las raíces. La fertilidad química se refiere al pH, agua y nutrientes minerales, los cuales son fundamentales para la sanidad de las plantas. Mientras que la fertilidad biológica del suelo se refiere a todos los organismos que reproducen en el suelo, descomponen la materia orgánica, liberan nutrientes y mejoran la estructura del suelo, contribuyendo a su fertilidad, ya que albergan microorganismos beneficiosos que controlan las enfermedades de las plantas, los insectos y las malas hierbas. Además, establecen asociaciones simbióticas favorables con las raíces, lo que promueve un intercambio beneficioso de nutrientes (Fernández et al., 2020).

1.2 PROBLEMA

Dentro de las áreas de producción de cereales de la parroquia Santa Fe, el problema central radica en el escaso conocimiento sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Esta situación se agrava por el acceso insuficiente a servicios de asistencia técnica enfocados en el manejo sostenible del suelo agrícola. Además, existe una limitada capacidad de monitoreo y ensayo de los niveles de fertilidad del suelo, tanto por parte del sector público como del privado. Cabe destacar que se observa una carencia de capacitación para los productores, fundamentales para implementar planes efectivos de manejo del suelo.

La limitación de monitoreo y análisis de suelo a nivel local, se traduce en un escenario en que las operaciones de manejo nutricional de los cultivos, incluido el trigo se desarrollan sin realizar enmiendas nutricionales a los cultivos, sin atender la demanda de nutrientes de cada cultivo.

La dificultad de acceso a asistencia técnica, hace que la aplicación de prácticas de conservación del suelo sea incipiente; especialmente las que están orientadas a sostener los niveles de fertilidad y la movilidad de los nutrientes, en consecuencia, no alcanzan un nivel de sensibilización respecto de la importancia de establecer formas de manejo sustentable del recurso suelo.

A raíz de lo expuesto, la presente investigación comenzó con la caracterización de las propiedades físico-químicas del suelo, los datos obtenidos son cruciales para analizar cómo la cobertura vegetal influye en su estado actual. Esta información no solo proporciona un conocimiento valioso, sino que también ayuda en la formulación de un plan de fertilización y manejo del recurso suelo, cuyo objetivo es optimizar las condiciones de uso agrícola, especialmente para los cereales como el trigo, un cultivo de gran importancia en la superficie cultivada de la parroquia Santa Fe.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Caracterizar físico-químicamente el suelo en áreas de producción de cereales, bajo la influencia de diferentes coberturas vegetales, en Santa Fe.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Valorar el estado actual de las propiedades físico-químicas del suelo.
- Comparar el estado de las propiedades del suelo con la cobertura vegetal dominante.
- Recomendar un plan de fertilización al suelo para optimizar el cultivo de trigo en la parroquia Santa Fe.

1.4 HIPÓTESIS

H₀: El estado de la cobertura vegetal del suelo en las áreas de producción, no influye sobre las propiedades físico-químicas del mismo.

H_a: El estado de la cobertura vegetal del suelo en las áreas de producción, influye sobre las propiedades físico-químicas del mismo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Caracterización del suelo

El suelo se forma por desintegración de las rocas debido a la acción de los agentes geológicos externos, como el agua y el viento, pero también intervienen las diferencias de temperatura y actividad animal. Los suelos volcánicos pueden encontrarse en un amplio rango de condiciones ambientales y de uso de la tierra: desde cultivos, praderas, plantaciones forestales y plantaciones frutales hasta ecosistemas prístinos de bosques y praderas nativos. Estos ecosistemas han sido considerados como sumideros de carbono (Dörner et al., 2019).

Suelos con fuerte acumulación de materia orgánica (humificación), por las condiciones naturales de formación de suelos, se encuentran en la región bajo bosques primarios, lo que da lugar a la formación de suelos Feozems o de Molisoles y Fluvisoles o Fluvents en las partes formadas de sedimentos. Sin embargo, debido a la actividad antropogénica parte de los suelos Feozems se han degradado y han dado lugar a Cambisoles (Hernández et al., 2022).

2.2. Concepto de suelo

El suelo es un organismo vivo complejo y dinámico que puede considerarse como la capa viviente de la Tierra. Se compone de elementos minerales y orgánicos, así como de aire y agua. En términos muy generales, los elementos minerales se componen de partículas como la arena, los sedimentos y la arcilla, formados por diferentes componentes químicos, mientras que los componentes orgánicos se derivan de organismos vivos, entre los que se encuentran las plantas, las bacterias, los hongos, la fauna y sus residuos. Los suelos son importantes depósitos de biodiversidad (EEA, 2023)

2.3. Clasificación por su categoría de uso

Las clases se reúnen en tres (3) grandes grupos:

- Grupo de tierras con capacidad para utilizarse en agricultura y ganadería tecnificada de tipo intensivo y semi intensivo (clases I a IV).
- Grupo de tierras que pueden utilizarse en forma restringida, en actividades agrícolas, ganaderas, agroforestales y/o forestales (clases V a VII).
- Tierras que deben utilizarse sólo en preservación, conservación y ecoturismo (clase VIII).

2.3.1. Clase I

Suelos con muy pocas limitantes para su uso, son casi planos, con muy pequeños problemas de erosión, profundos, bien drenados, fáciles de trabajar, con buena capacidad de retención de agua y responden a la fertilización. El clima local es favorable para el crecimiento de muchos cultivos a menos que las limitantes de lluvia hayan sido eliminadas mediante obras de riego (IGAC, 2021).

2.3.2. Clase II

Las tierras de la Clase 2 presentan limitaciones ligeras que pueden reducir la posibilidad de elección de plantas para cultivo y requieren prácticas de manejo fáciles de aplicar, incluyendo las de conservación, para prevenir su degradación o para mejorar la relación agua-aire (INTA, 2021).

2.3.3. Clase III

Estos suelos tienen limitaciones moderadas en su uso y restringen la elección de los cultivos. Tienen limitaciones moderadas que requieren de prácticas especiales de conservación. La topografía varía de plana a moderadamente inclinada, la permeabilidad varía de lenta a muy rápida (IGAC, 2021).

2.3.4. Clase IV

Las tierras de la clase IV tienen limitaciones severas que la restringen a cultivos específicos y exigen prácticas cuidadosas de manejo y conservación difíciles de aplicar y mantener. Se pueden utilizar en ganadería con pastos de buenos

rendimientos y con un manejo técnico de los potreros. La agroforestería es una buena opción en los sectores de pendientes más pronunciadas, áreas erosionadas y susceptibles al deterioro (INTA, 2021).

2.3.5. Clase V

Estos suelos presentan escaso o ningún riesgo de erosión, pero tienen severas limitaciones que no pueden modificarse en forma práctica, lo que limita su uso a praderas naturales o forestales. Son suelos casi planos, muy húmedos, o pedregosos no aptos para ser cultivados. Pueden experimentar inundaciones frecuentes y prolongadas o salinidad excesiva o limitaciones climáticas (IGAC, 2021).

2.3.6. Clase VI

Las tierras de la clase 6 presentan limitaciones muy severas que, en términos generales, las hacen aptas únicamente para algunos cultivos semiperennes o perennes, semi densos y densos; también se pueden desarrollar sistemas agroforestales y forestales. La ganadería extensiva es un uso alternativo si se lleva a efecto evitando el sobrepastoreo y con buen manejo de los potreros (INTA, 2021).

2.3.7. Clase VII

Estos suelos pueden ser aprovechados para pastoreo o la producción de maderas o combinaciones de ella, aplicando prácticas de manejo (IGAC, 2021).

2.3.8. Clase VIII

Son suelos sin valor agrícola y ganadero. Su uso está limitado solamente para la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas. Incluyen dunas activas, pedregales, pantanos o suelos destruidos por la erosión (INTA, 2021).

2.4. Taxonomía del suelo

La taxonomía del suelo establece seis categorías taxonómicas: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie (Moreno & Ibañez, 2020).

El Orden es la categoría más alta de la taxonomía del suelo y refleja, en líneas generales, el tipo y grado de afección de los diferentes procesos formadores que ha

sufrido el suelo durante la formación de los horizontes que constituyen su perfil (Lince & Sadeghian, 2021).

2.4.1. Entisol

Los suelos se caracterizan por su escaso desarrollo pedogenético, es decir, carecen de horizontes diagnósticos bien definidos como: los horizontes argílicos o espódicos, salvo un horizonte A superficial poco diferenciado. Su formación es incipiente y se produce en condiciones donde los procesos de formación del suelo han tenido escasa influencia, ya sea por la juventud del material parental, deposición reciente como: aluviones, dunas o coladas volcánicas, pendientes muy pronunciadas que impiden la acumulación de materiales, o por condiciones climáticas extremas que limitan la actividad biológica. Estos suelos pueden encontrarse en una amplia gama de ambientes, desde desiertos hasta regiones montañosas, y son típicamente de textura variable, con escasa estructura y baja capacidad de retención de nutrientes y agua (Chaparro et al., 2017).

2.4.2. Inceptisol

Este tipo de suelos pueden formarse en casi cualquier entorno cuyas diferencias comparables de vegetación son grandes, excepto en un entorno árido. Las propiedades únicas de los inceptisoles son una combinación de uno o más horizontes pedogénicos de alteración o concentración con poca acumulación de materiales translocados que no sean carbonatos o sílice amorfa. Además, los Inceptisoles no tienen una o más de las propiedades únicas de los mollisoles, que son un horizonte superficial grueso y oscuro y un alto aporte de calcio, o la propiedad única de los andisoles, que es el predominio de minerales de orden corto o complejos Al-humus (Hernández et al., 2022).

2.4.3. Mollisol

Son suelos que tienen un horizonte superficial de color oscuro y son ricos en bases. Muchos también tienen un horizonte argílico o nátrico o un horizonte cálcico. Algunos tienen un horizonte álbico. Algunos también tienen un horizonte duripán o petrocálcico. Casi todos los Mollisoles tienen un epipedón mólico. La mayoría ha albergado vegetación herbácea, aunque muchos aparentemente han estado

forestados. Los Molisoles se utilizan principalmente como tierras de cultivo. Por lo general; en las regiones más secas se cultivan cereales, en las regiones más cálidas y húmedas se cultivan maíz y soja (USDA, 2022).

2.5. Propiedades físicas del suelo

2.5.1. Textura

La textura se define como la proporción de arena, limo y arcilla en el suelo ya que, al ser de diferente tamaño, su presencia y proporción determina el tipo de suelo. Es uno de los parámetros más importantes para el suelo ya que influye enormemente, junto con la estructura, en otras propiedades como la permeabilidad, la aireación y la capacidad de retención de agua y nutrientes. En cuanto a dinámica del agua y aire, ofrece a las raíces la exploración en este medio de agua y nutrientes (RRS, 2023).

2.5.2. Penetrabilidad

Es la resistencia que presenta un suelo a la penetración radical y está íntimamente ligada a la densidad aparente (sólidos por unidad de volumen) y al nivel de humedad del suelo. Se mide con aparatos denominados penetrómetros y se expresa en kg cm^{-2} o MPa, utilizando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{N * M * g * SD}{A * PD}$$

Donde:

R = la resistencia a la penetración (MPa)

N = el número de impactos

M = la masa de la pesa (5 kg)

g = la gravedad = 9.81 m s^{-2}

SD = la distancia que se desliza el martillo (m)

A = el área de la superficie del cono (m^2)

PD = la distancia de penetración (m)

2.6. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas tienen relación con la disponibilidad de nutrientes y agua de calidad para las plantas. De ahí que, sin un estudio adecuado de los indicadores que conforman la fertilidad y naturaleza química de los suelos, es difícil comprender la fisiología de la nutrición de los cultivos (Zárate et al., 2024).

2.6.1. pH

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo es ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5.5) tienden a presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (>8.5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6.5 (FAO, 2024)

2.6.2. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH_4^+ , etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la habilidad de los suelos para retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelos y meq por 100g de suelo (FAO, 2024).

2.6.3. Macronutrientes esenciales

Los macronutrientes son indispensables para las plantas, ya que ayuda en su desarrollo y crecimiento, su disponibilidad depende del material que está formado en el suelo, la agregación de fertilizantes, la lixiviación de nutrientes por el perfil del suelo, la erosión y el consumo de nutrientes (Hernández & Barrera 2018).

2.7. Cobertura vegetal

Se desarrollan de manera controlada sobre una superficie agrícola para reducir la erosión, minimizar la aparición de vegetación espontánea o mejorar la calidad del suelo. Generalmente se emplean especies de la familia de las gramíneas, que se desarrollan con rapidez y no requieren de cuidados. También leguminosas, que son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico en el suelo y, por tanto, mejorar la capacidad edáfica del mismo, ya que, al ser destruidas las partes aéreas de las plantas de cobertura se incorporan al ciclo del suelo como materia orgánica, mejorando el desarrollo y el mantenimiento de la vida microbiana (Burga, 2023)

2.7.1. Barbecho

Es una técnica agrícola que consiste en mantener la tierra en descanso de cultivo durante uno o varios periodos vegetativos, nominalmente sin ser un sinónimo de “rotación de cultivos”, estos periodos de descanso suelen realizarse cada dos o tres años y, generalmente, suponen el 40% de la superficie cultivable. Durante el período de barbecho, grandes cantidades de nutrientes son almacenados en la biomasa de la sucesión vegetal y luego liberados, cuando la tierra está siendo preparada para el nuevo ciclo de siembras, de esta manera, se asegura que los huertos sean altamente productivos y que la siembra no se vea detenida nunca (Licona, 2019).

Tipos de barbecho

Existen generalmente dos tipos de barbecho, según el período de reposo entre cultivos:

- **Barbechos cortos:** pasan uno o dos años hasta que la tierra es cultivada de nuevo. La regeneración del terreno no es completa.
- **Barbechos largos:** los periodos de descanso de tierra son más prolongados, de tres a cuatro años. La regeneración del terreno es completa (FERVALLE, 2023).

2.7.2. Cultivos y pastos

Los cultivos y pastos, son aquellos que tienen un ciclo de vida de menos de 12 meses y requieren de una nueva siembra para obtener una cosecha. Se caracterizan por germinar, crecer, florecer, dar frutos, madurar y morir, y se destruyen al ser cosechados. El manejo del pasto es una práctica rentable usada en la producción ganadera que proporciona a los animales hierbas y leguminosas forrajeras, lo que mantiene el suelo sano. Los pastos y la producción de forraje reducen los costes de producción (EOSDA, 2024).

2.7.3. Quema reciente

El fuego ha sido usado por el hombre de manera ancestral y está muy relacionado a la agricultura desde tiempos remotos, para la eliminación de cobertura vegetal residual de una cosecha previa, como método de control de diferentes plagas. El uso del fuego en el sector agropecuario representa un riesgo por los daños provocados en la calidad del aire, la pérdida de biodiversidad y el empobrecimiento de los suelos de cultivo (SADR, 2022).

2.7.4. Vegetación natural primaria

Se refiere a la vegetación original de un área que ha permanecido intacta y sin la intervención humana significativa. Esta cobertura vegetal habría existido en un lugar antes de cualquier alteración humana, como la agricultura, la urbanización o la tala intensiva. Está compuesta por especies de plantas nativas adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas específicas de la región (Ramón & Bollo, 2023).

Tipo de vegetación

Bosque Seco-Montano Bajo se encuentra localizada entre 2000 y 3000 msnm, con variaciones micro climáticas de acuerdo a los pisos altitudinales de las cordilleras. La vegetación primaria de esta formación ha sido alterada completamente, con pocas asociaciones de árboles y muchas áreas de cultivos de subsistencia. En algunas zonas se localizan formaciones de eucaliptos, cipreses y pinos (González & Maldonado, 2022).

2.7.5. Vegetación natural secundaria

En la sucesión secundaria, un área anteriormente ocupada por seres vivos se ve alterada, para luego ser colonizada después de la perturbación. En las primeras fases de la sucesión, la vegetación es pequeña, simple, sencilla, y tiene una estructura simple, es decir, únicamente aparece uno o dos estratos, apenas se dan fenómenos de cooperación o competencia entre las especies, y no se cubre totalmente el suelo (Zamora et al., 2018).

2.7.6. Causas y consecuencias de la pérdida de la cobertura vegetal

La degradación del suelo se produce de forma natural, pero también hay actividades humanas que degradan el suelo, como: la deforestación, la agricultura industrial, el pastoreo excesivo y la urbanización han acelerado este proceso en las últimas décadas, principales razones de la degradación impulsadas por el hombre:

- Malas prácticas agrícolas, como el monocultivo, agota ciertos nutrientes del campo; el riego ineficaz, que afecta negativamente a la estructura de la tierra y a la disponibilidad de nutrientes; o la dependencia excesiva de fertilizantes y pesticidas químicos, que conduce a una degradación de la salud del suelo.
- Prácticas de cultivo agresivas, como el arado profundo y la labranza pesada, que debilitan los agregados del suelo y alteran su estructura.
- Pastoreo excesivo, que provoca la degradación de los suelos al agotar la cubierta vegetal y aumentar la compactación del suelo.
- La erosión, la tierra vegetal, la materia orgánica y los nutrientes pueden perderse a causa de la erosión hídrica, que se produce como consecuencia del

riego excesivo y un drenaje deficiente. Del mismo modo, las partículas finas son arrastradas por la erosión del viento cuando los campos afectados por la sequía quedan desnudos (EOSDA, 2024).

2.8. Erosión eólica

Una superficie de suelo liso y expuesta es siempre más susceptible a la erosión que una superficie cubierta o protegida. La aplicación de prácticas de labranza cero, labranza en franjas y labranza mínima, cultivos de cobertura, sincronización de la gestión con el clima, cortavientos y otros métodos de gestión de la conservación pueden ayudar a mantener el suelo en su sitio y a evitar la generación de polvo. Los suelos con terrones o con crestas y depresiones creadas por la labranza y perpendiculares a la dirección del viento, inhiben la erosión (Colazo et al., 2023).

2.9. Erosión hídrica

La erosión hídrica es el impacto de las gotas de lluvia, cuando golpean la superficie del suelo, estas desprenden las partículas, destruyendo los agregados del suelo. Esto hace que las partículas individuales del suelo sean más susceptibles al desprendimiento y al transporte. Los sedimentos en suspensión son flujos concentrados que provocan una mayor pérdida de suelo al socavar el fondo y los laterales del canal (NRCS, 2015)

2.10. Tipos de degradación del suelo

2.10.1. Química

Está causada, principalmente, por la utilización excesiva de los fertilizantes sintéticos y los pesticidas, afectando a la cantidad de microbios beneficiosos y al contenido de humus, y cambia el pH del suelo (Tinal et al ., 2020).

2.10.2. Física

La degradación del suelo por una causa física provoca la pérdida y agotamiento de la capa fértil del suelo debido a eventos como inundaciones, escorrentías superficiales, corrimientos de tierras, viento, tormentas, labranza intensiva o el uso de maquinaria pesada (EOSDA, 2024).

2.11. Manejo sustentable del recurso suelo

En un sistema de manejo agrícola sostenible, que promueve la actividad biológica del suelo. Este se basa en el correcto uso de insumos con fines nutricionales en las plantas, y a la vez con prácticas de manejo que recuperen, mantengan y aumenten la armonía del ecosistema. Conocer el uso de herramientas de diagnóstico nutricional como análisis de suelos, agua, y plantas, permite tomar decisiones acertadas y eficientes en cuanto a las prácticas de abonamiento para hacer un adecuado manejo de la fertilidad y conservación del suelo (Barrera, 2021).

Para la sostenibilidad de este recurso se debe mejorar la retención y absorción de agua, mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantas, teniendo en cuenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Asimismo, la actividad biológica del suelo, se ve afectada por el manejo agrícola del suelo, en su interacción con el sistema agua-suelo-planta reflejando el estado del mismo, respecto a su manejo y conservación (Gutiérrez, 2020).

2.12. Enmienda del suelo

La enmienda mediante la adición de un producto o la mezcla de unos productos permiten subsanar una condición específica detectada en el suelo y mejorar la calidad del mismo, para corregir, reparar o rectificar, la carencia de elementos del suelo. La corrección permite mantener la productividad de las plantas; de lo contrario, no permitiría que el cultivo o la planta se desarrolle adecuadamente (Pérez et al., 2024).

Productos orgánicos como el humus para la corrección del suelo, sirven para la prevención de fuentes naturales. Además, influyen en el mejoramiento de la estructura o propiedades del suelo, contiene cantidades de nutrientes y logran ajustar el pH del suelo para su acidez o basicidad (Buritica, 2022).

2.12.1. Enmiendas orgánicas

Las enmiendas a partir de materiales orgánicos como: el estiércol, el mantillo, la tierra de castaño, cenizas, posos de café, cáscaras de huevos, compost, humus de

lombriz, cultivo vegetal de leguminosas y otros, promueven las mejores condiciones para el suelo y mayores rendimientos para los cultivos (Buritica, 2022).

2.13. Manejo nutricional del cultivo de trigo

2.13.1. Requerimientos Nutricionales

Algunos elementos se requieren en cantidades sumamente grandes (> 1g por kg de materia seca), a estos se denominan macronutrientes, mientras otros se requieren en pequeñas cantidades y se denominan micronutrientes.

- Macronutrientes: Carbono, Oxígeno, Hidrógeno, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Azufre, Calcio y Magnesio.
- Micronutrientes: Boro, Cobre, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Zinc y Cloro (Simón & Golik, 2022).

Un plan de manejo nutricional debe enfocarse en conseguir un equilibrio correcto de estos nutrientes esenciales para un crecimiento óptimo. No quiere decir que se aplique la totalidad de los 16, pero el uso correcto de herramientas de diagnóstico y análisis debe mostrar cuáles de los 16, presentan deficiencias, afectando el rendimiento (Hernández et al., 2021).

Para mantener la situación nutricional en el suelo es calcular la cantidad removida por el cultivo cosechado, y asegurar que esos nutrientes se repongan durante el ciclo de rotación (Ferraris, 2022).

2.13.2. Efecto de la deficiencia de nutrientes en el cultivo del trigo

Nutriente	Función	Síntomas de deficiencia
Nitrógeno	Produce aminoácidos, que producen las proteínas que construyen las células, y es uno de los componentes básicos del ADN.	Clorosis de las hojas inferiores debido a la movilidad hacia las hojas superiores.
Fosforo	Estimulación del desarrollo de raíces en la germinación Mejor precocidad del cultivo Formación de espigas y grano	Las hojas color púrpura Plantas de menor crecimiento. Menor número de macollos y raíces secundarias

	Mejor formación de macollos y otras estructuras reproductivas del trigo.	Crecimiento lento de la planta
Potasio	Es esencial para el funcionamiento de las estomas. Mantener equilibrio de las plantas Resistencia de plantas a sequías, heladas y enfermedades. Aumentar el tamaño y peso del grano. Mayor asimilación de abonos nitrogenados.	Crecimiento de plantas inicial desparejo, hojas adquieren color verde oscuro con las puntas juveniles hacia abajo Hojas inferiores con márgenes cloróticos y puntas necróticas. Plantas con entrenudos cortos y tallos débiles con mayor susceptibilidad al acame.
Azufre	Formación y funcionalidad de proteínas. Eficiencia de uso de la radiación a la calidad de producción.	Menor crecimiento de plántulas. Plantas presentan clorosis foliar en las nervaduras y progresa hacia toda la hoja
Magnesio	Favorece en la formación de la semilla	Manchas cloróticas internervales
Cobre	Formar lignina en las paredes celulares para mantener la posición de la planta vertical. Formación de polen, semillas y resistencia al estrés.	Hojas nuevas amarillentas o secas y espigas deformadas.
Hierro	Mantener la estructura de los cloroplastos. Formar la molécula de la clorofila en la planta. Esencial en la asimilación de nitratos y sulfatos	Clorosis en hojas jóvenes Amarillamiento de hojas viejas. Clorosis avanzada se torna blanca y pierde su color verde Finalmente llega la necrosis general avanzando desde la punta y los márgenes
Calcio	Mayor crecimiento radicular Mejor calidad de los granos	Tallos cortos Malformación de hojas nuevas Hoja bandera se retuerce o se curva.
Boro	Proceso de polinización y cuajado de frutos. Formación y vigor del grano.	Pequeñas manchas cloróticas que se forman entre las venas de las hojas más jóvenes no desarrolladas. Más brotes y entrenudos más cortos, deficiencia en el uso del agua y tolerancia a la sequía.

Zinc	Activación de enzimas, síntesis de proteínas integridad de membrana plasmática, división celular, fotosíntesis y resistencia a estrés biológico	Crecimiento y desarrollo de plantas Reducción del rendimiento del cultivo
Manganeso	Asimilación del nitrógeno. Aumenta la resistencia a enfermedades.	Manchas cloróticas y líneas gris que van a blanquecino. Las hojas se retuercen o se doblan así abajo.

Fuente: (INTA, 2021).

2.14. Grilla de muestreo

Como parte del proceso de recolección de datos en sitio, se requiere definir una grilla de muestreo, para esto se apoyó en la herramienta “Create Fishnet” que genera una malla cuadrangular y un punto en el centro de cada cuadrado. Tomando como criterio que, para la construcción de la misma, se observa que el tamaño real en campo estaría en el rango de entre los 20 a 30 m por lado. El centro de cada cuadrado que muestra la grilla será tomado como la coordenada de referencia para el muestreo de las variables en sitio (Galindo et al., 2024).

Para la definición de la grilla de muestreo se emplea el método con probabilidad proporcional al tamaño, el cual permite una medida clara del tamaño de cada unidad a ser estudiada para que en función de ella se fije el tamaño de la muestra. Si se utiliza un equipo GPS de mano para ubicar el espaciamiento de cada punto de muestreo se define, la toma de un total de 10 muestras por hectárea; más aún cuando se prevé un distanciamiento entre sitios inferior a 20 m, podría verse influenciado por el error de precisión del equipo seleccionado (GIS, 2024).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación y caracterización de la investigación.

La presente investigación se encuentra localizada en la provincia Bolívar, cantón Guaranda en la parroquia Santa Fe.

- **Situación geográfica y Edafoclimática**

Altitud	2480 – 3320 mnsn
Latitud	716112/E - 721612/E
Longitud	9823452/N - 9818452/N
Temperatura Máxima	29°C
Temperatura Mínima	11°C
Temperatura Media Anual	15°C
Precipitación Media Anual	950 mm
Heliofanía	930 H/L/año
PH	7.61-5.93
Suelo	Franco – Franco arcillo
Humedad	20 % – 40%

Fuente: Estación Metereológica UEB

- **Zona de vida**

La localidad de acuerdo a la zona de vida se encuentra en el Bosque seco Montano Bajo (bs-MB) (Holdridge, 1979).

3.2. Metodología

3.2.1. Material en estudio

Muestras de suelo de las áreas de producción de cereales, recogidas del horizonte A, a una profundidad comprendida entre los 0 y los 20 centímetros.

3.2.2. Factores en estudio

Estratificación de la cobertura actual del suelo.

3.2.3. Tratamientos

En la presente investigación no se definen tratamientos, pero la grilla de puntos estima un total de 97 unidades de análisis (mapa en el anexo 2).

3.2.4. Tipo de diseño experimental o estadístico

Esta investigación no utiliza un diseño experimental al no definirse tratamientos, en su lugar, se estableció un sistema de muestreo bifásico de puntos con estratificación incompleta, donde la cobertura actual del suelo será el principal factor.

3.2.5. Manejo de experimento

Concierne a la fase inicial del proyecto, en la cual se realizó las siguientes actividades:

Ubicación de la unidad de análisis

Con un equipo GPS (GARMIN MAP, modelo 62cs), con la base de datos de las coordenadas que corresponden a la grilla de muestreo, se empleó la función Find (encontrar), se direccionó hacia el sitio de monitoreo.

Protocolo de monitoreo

Una vez que se llegó al punto de monitoreo se ejecutó el siguiente procedimiento:

- **Determinación de la resistencia a la penetración**

Para calcular el índice de penetración, se retiró cualquier rastrojo de la superficie del suelo a muestrear, utilizando el penetrómetro dinámico se dejó caer la pesa desde su nivel más alto, se registraron los impactos necesarios para llegar a los 20 cm establecidos, y finalmente se anotó el número de golpes en el libro de campo.

- **Determinación del pH, humedad y temperatura del suelo**

En el punto de ubicación según la grilla y con la ayuda de un medidor de suelos digital (Sk-St5; modelo JHL9918) a una profundidad de 15 cm, se obtuvieron los datos de pH, humedad expresada en porcentaje y temperatura en grados centígrados.

Procedimiento para la toma física de muestra de suelo

- **Instalación del penetrómetro**

Se retiró la maleza de la superficie del suelo y se colocó el penetrómetro dinámico, el equipo fue desarrollado según las especificaciones del CIMMYT (Castellanos et al.,2013). Se cuantificó el número de golpes necesarios hasta llegar a una profundidad comprendida de entre 0 a 20 centímetros, el dato se expresó en número.

- **Toma de muestra física de suelo**

Las muestras de suelo se tomaron a una profundidad comprendida de entre 0 a 20 cm con la ayuda de un barreno o pala metálica. Se tomó alrededor de 7 a 10 submuestras en un radio de 100 m al contorno de cada uno de los puntos en estudio y luego se homogenizó la muestra retirando cualquier partícula vegetal. Luego se colocó en una funda ziploc y se etiquetó con el número de punto georreferenciado correspondiente.

- **Resguardo y traslado de muestras**

Se procedió a pesar una cantidad de 1100 g de suelo y etiquetarlo de acuerdo a las normativas requeridas por el laboratorio de suelos INIAP y finalmente se transportó a la Estación Experimental Santa Catalina para su respectivo análisis.

3.2.6. Métodos de evaluación (variables respuestas)

- **Humedad (H)**

Se determinó con el medidor de suelo digital de suelo (Sk-St5, modelo JHL9918), en cada uno de los puntos georreferenciados y sus datos fueron expresados en porcentaje (%).

- **Temperatura (T)**

Se registró con el medidor de suelo digital de suelo (Sk-St5, modelo JHL9918), en cada uno de los puntos georreferenciados, el mismo que fue expresado en grados centígrados (°C).

- **Resistencia a la penetración (RP)**

Se calculó con la utilización de número de golpes obtenidos con el penetrómetro dinámico, según la metodología establecida por el CIMMYT y su resultado se expresó en Megapascuales (MPa).

$$R = \frac{N * M * g * SD}{A * PD}$$

- **Datos que se evaluaron en laboratorio**

Los métodos de análisis para las propiedades físicas y químicas del suelo empleados por el Laboratorio de suelos de la Estación Experimental Santa Catalina se pueden revisar a continuación:

Métodos de análisis empleados por el laboratorio.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
pH a 25 °C	H ⁺	Electrométrico
Materia Orgánica	%	Volumétrico
Textura		Boyocus
Nitrógeno	ppm	Colorimétrico
Fósforo	ppm	Colorimétrico
Potasio	meq/100g	Absorción Atómica
Calcio	meq/100g	Absorción Atómica
Magnesio	meq/100g	Absorción Atómica
Zinc	ppm	Absorción Atómica
Hierro	ppm	Absorción Atómica
Manganeso	ppm	Absorción Atómica
Cobre	ppm	Absorción Atómica
Boro	ppm	Colorimétrico
Conductividad Eléctrica	S/m	Conductímetro

Fuente: Laboratorio de suelos de la Estación Experimental Santa Catalina

3.2.7. Análisis de datos

Se realizó un análisis con modelos lineales mixtos seguido de una prueba LSD de Fisher $p < 0.05$ para la separación de medias. Estas pruebas estadísticas se realizaron utilizando el software estadístico Infostat versión estudiantil.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Interpretación de resultados

4.1.1. Estado de las propiedades físico-químicas del suelo

Tabla 1.

Análisis de la distribución espacial de las propiedades químicas

Propiedades químicas	Bajo		Medio		Alto		Muy Alto	
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje
Nitrógeno Total	782.16	29.1%	892.44	33.2%	1017.29	37.8%		
Fósforo	385.94	14.3%	391.26	14.5%	488.01	18.1%	1426.27	53.0%
Potasio	49.12	1.8%	86.11	3.2%	175.73	6.5%	2379.26	88.4%
Calcio		0.0%	778.33	28.9%	1913.39	71.1%		0.0%
Magnesio		0.0%		0.0%	2691	100%		0.0%
Zinc		0.0%		0.0%	2691	100%		0.0%
Hierro		0.0%		0.0%	2691	100%		0.0%
Manganeso		0.0%		0.0%	2691	100%		0.0%
Boro		0.0%		0.0%	326.03	12.1%	2365.93	87.9%
Materia orgánica	1355.89	50.4%	633.69	23.5%	83.82	3.1%	617.47	22.9%

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las propiedades químicas, destacándose el nitrógeno como un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Al efectuar la distribución espacial, se determina que el 37.8% de los suelos presentan un alto nivel de nitrógeno total, con valores superiores a 25 ppm. Esta superficie se caracteriza por su topografía inclinada que limita la mecanización, muestra también mayor de contenido de materia orgánica, lo que explica los altos contenidos de nitrógeno total. En contraste, el 32.2% registran niveles medios, entre 16 a 25 ppm, mostrando una clara influencia de la actividad antrópica. Finalmente, el 29.1% de la superficie presentan niveles bajos de nitrógeno total, por debajo de 15 ppm, se encuentran específicamente en áreas dedicadas a la producción, las cuales evidencian un intenso proceso de laboreo del suelo, facilitado por la accesibilidad de mecanización del terreno, lo que ha provocado el afloramiento de la cangahua y disminución de este nutriente esencial.

En relación con el fósforo, el 53% y 18.1% de la superficie presentan niveles muy altos y altos, superando los 31 ppm a 30 ppm. Esta concentración alta se da principalmente en las áreas destinadas al cultivo de cereales y se asocia al uso intensivo de fertilizantes ricos en fósforo, tales como el 18-46-00 y 10-30-10, provoca una acumulación debido a su escasa movilidad en el suelo. En contraste, el 14.3% de la superficie muestra niveles bajos, inferiores a 15 ppm, principalmente en áreas con pendientes pronunciadas, donde la erosión hídrica facilita la pérdida de este elemento hacia las áreas de menor altitud.

En cuanto al potasio el 88.4% y 6.5% de la superficie registran niveles muy altos y altos, con valores superiores al 21 a 30 meq/100g, lo cual se relaciona con el origen volcánico de los suelos. Sin embargo, el potasio no es aprovechado eficientemente por los cultivos debido al desbalance con otros elementos del suelo, causado por el uso indiscriminado de fertilizantes, y la textura arcillosa del suelo, que favorece la fijación del potasio, limitando su disponibilidad para las plantas. Según INTAGRI (2017), una parte del potasio añadido al suelo con fertilizantes químicos sintéticos es absorbida por las plantas, otra parte mayor es adsorbida por los coloides y el resto es retenido entre las capas de las arcillas.

El 71.1% de las áreas de producción evidencian niveles altos de calcio, que registran valores por encima de 12.48 - 24.95 meq/100g, atribuibles a su origen volcánico, rico en minerales como: carbonatos, silicatos, yeso y otros compuestos. Sin embargo, no todo el calcio presente está disponible para las plantas, ya que gran parte se encuentra en formas no asimilables, y su disponibilidad depende de la relación que beneficia o limita su movilidad con el magnesio y el potasio.

El contenido de magnesio es alto en el 100% de la superficie estudiada, con valores superiores a 1.23 meq/100g, esta abundancia está intrínsecamente ligada al material parental original, como las cenizas y rocas volcánicas ricas en minerales como el olivino y la dolomita, que liberan magnesio al meteorizarse. Además, la elevada presencia de arcilla en estos suelos favorece la retención de cationes de magnesio y fósforo.

Los microelementos como: el zinc, hierro, manganeso y boro, muestran una alta concentración entre 87.9% y el 100% de la superficie analizad, estos valores superan los niveles de referencia para Zn (7ppm), Fe (40ppm), Mn (15ppm) y B (2ppm), aunque todas las áreas de producción de cereales presentan niveles elevados de estos elementos, las concentraciones más altas se encuentran en áreas con alto contenido de materia orgánica y un pH ligeramente ácido.

En la parroquia Santa Fe, el 50.4 % y 23.5 % de las áreas dedicadas a la producción de cereales muestran niveles bajos a medios de materia orgánica, correspondiente a 1.6 – 3 % y 3.1 - 4.5 %, esto se relaciona con prácticas agrícolas como el monocultivo, el control intensivo de malezas y la eliminación de residuos postcosecha. En contraste, el 26% de las áreas muestran un alto nivel de materia orgánica superando el 4.6%, debido a la incorporación de restos vegetales, periodos prolongados de descanso del suelo y la presencia de vegetación natural, lo que incrementa la disponibilidad de materia orgánica en el suelo.

Tabla 2.

Análisis de la distribución espacial del pH

Propiedades químicas	Moderadamente ácido		Neutro	
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje
pH	844.13	31.4%	1847.33	68.6%

En la Tabla 2, se presenta la distribución del pH de los suelos de la parroquia Santa Fe, los datos reflejan que el 68.6% de la superficie evaluada muestran un pH neutro, lo cual resulta notable considerando que estas áreas están sujetas a un manejo agrícola convencional basado en monocultivos. Esta neutralidad del pH se atribuye a prácticas como la fertilización química regular. En contraste, el 31.4% de la superficie que corresponden aproximadamente 844.13 ha, muestran un pH ligeramente ácido, esta acidez se asocia a las áreas donde se conserva una mayor cobertura vegetal, lo que implica una menor intervención antrópica. En estas áreas, la constante caída de residuos vegetales genera compuestos orgánicos ácidos durante su proceso de mineralización, lo que progresivamente acidifica el suelo, este fenómeno natural explica la variabilidad del pH y permite comprender el comportamiento edáfico en función del tipo de cobertura vegetal del suelo.

Tabla 3.*Análisis de la distribución espacial de los niveles de compactación*

Propiedades físicas	Bajo		Medio		Alto	
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje
Compactación	2.96	0.1%	1171.12	43.5%	1517.54	56.4%

De acuerdo con la Tabla 3, la mayoría de la superficie analizada muestran altos niveles de compactación, el 56.4% correspondiente a 1517.54 ha con rangos que van de 3 a 4.84 MPa, están estrechamente relacionados con las prácticas agrícolas intensivas, como la labranza frecuente y el monocultivo prolongado. Los cuales alteran negativamente la estructura del suelo, reduciendo significativamente el espacio poroso, provocando un aumento en la resistencia a la penetración, lo que impide la adecuada infiltración y retención del agua. Además, disminuye la aireación del suelo, impide el desarrollo profundo de las raíces de los cultivos y disminuye la actividad biológica del suelo, incrementando considerablemente el riesgo de erosión. Por consiguiente, el 43.5% de la superficie equivalente a 1171.12 ha, presenta un nivel de compactación medio, con rangos entre 0.69 a 2.99 MPa. En contraste, el 0.1% de la superficie cubierta por vegetación arbustiva, correspondiente a 2.96 ha, presenta un nivel de compactación bajo con rangos entre >0.46 y 0.69 MPa, la estructura del suelo se mantiene porosa y aireada, esta condición se debe a la ausencia de intervención agrícola y el aporte constante de materia orgánica proveniente de la descomposición lenta de residuos vegetales autóctonos.

Tabla 4.*Análisis de la distribución espacial de la relación catiónica Ca/Mg*

Relación catiónica	Bajo nivel del calcio respecto al magnesio		Ideal		Deficiencia de magnesio	
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje
Ca/ Mg	0.05	0.0%	2019.67	75.0%	671.93	25.0%

En la Tabla 4, se muestra la relación catiónica entre el calcio y el magnesio, el 75% de la superficie correspondiente a 2019.67 ha, presenta una relación Ca/Mg dentro del rango ideal entre 1.66 a 4.96 ppm. Este equilibrio catiónico favorece un balance

adecuado entre ambos nutrientes, lo cual tiene un impacto positivo en el suelo, promoviendo la formación de agregados estables mediante la aglomeración de partículas de arcillas. Adicionalmente, mejora significativamente la porosidad, la aireación y el drenaje del suelo, facilitando a su vez el desarrollo óptimo del sistema radicular de los cultivos. En contraste, el 25% de la superficie equivalente a 671.93 ha, presenta una relación Ca/Mg superior al rango óptimo entre el 5.01 a 15.37 ppm, lo que evidencia principalmente la deficiencia de magnesio, lo que podría afectar la asimilación de otros nutrientes, por lo que requeriría de una enmienda de suelo.

Tabla 5.

Análisis de la distribución espacial de la relación catiónica Ca+Mg/K

Relación catiónica	Adecuado para el potasio		Deficiencia de potasio	
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje
Ca + Mg/ K	2524.26	93.8%	167.12	6.2%

La relación catiónica entre Ca+Mg/K del suelo en Tabla 5, muestra que el 93.8% de la superficie con 2524.26 ha, con rangos entre el 5.15 a 39.01 ppm, presentan condiciones ideales. En contraste, el 6.2% de la superficie equivale a 167.12 ha, con rangos entre el 46 a 85.26 ppm, se evidencia una deficiencia relativa del potasio, lo que sugiere la necesidad de aplicar enmiendas para corregir este desequilibrio.

Si bien la relación (Ca + Mg) / K proporciona una visión integrada de estos cationes en el suelo, es fundamental reconocer que otros procesos edáficos y biológicos, que modulan significativamente la absorción y disponibilidad de cada elemento. Factores como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, la mineralogía de la arcilla, el pH, la presencia de aniones como fosfatos y sulfatos, y la actividad microbiota del suelo, influyen en la retención y liberación de Ca, Mg y K (Del Rey, 2019). Además, la competencia iónica en la rizosfera, la selectividad de absorción según su especie vegetal y su estado fenológico, así como las prácticas de manejo; la fertilización y el encalado, pueden alterar la relación catiónica efectiva percibida por las plantas. Por lo tanto, una relación óptima puede ser punto de partida, una evaluación integral de la fertilidad del suelo debe considerar estos procesos interactivos para comprender correctamente la disponibilidad y el equilibrio de nutrientes esenciales para un desarrollo vegetal óptimo.

4.1.2. Estado de las propiedades físicas de los suelos productivos

Tabla 6.

Análisis de la influencia del tipo de cobertura vegetal sobre las propiedades físicas del suelo

Propiedades físicas	Tipos de cobertura (medias)				Tipos de cobertura vegetal (p-valor)
	Vegetación natural primaria	Vegetación natural sucesión vegetal	Cultivos y pastos	Quema reciente	
Compactación del suelo (Mpa) **	0.67	2.7	2.02	2.67	<0.0001
Temperatura de suelo (°C) *	14.67	19.3	21.59	22.33	0.0256
Humedad del suelo (%) *	37.33	36.1	31.28	30.33	0.0276

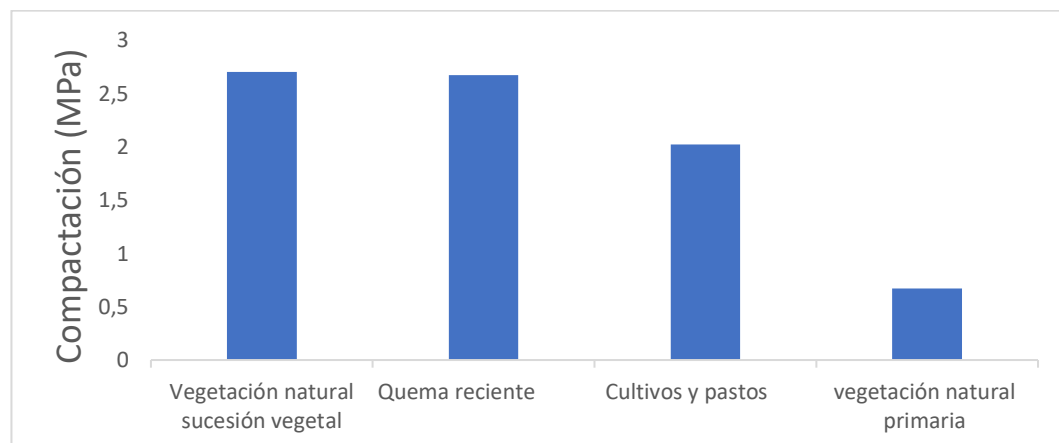
Nota: ** $p < 0.01$ = Altamente significativo; * $p < 0.05$ = Significativo; $p > 0.05$ NS = No significativo.

Los resultados presentados en la Tabla 6, indican que las propiedades físicas del suelo como: la compactación, la temperatura y la humedad, muestran diferencias estadísticas significativas relacionadas con el tipo de cobertura vegetal dominante.

En relación con la compactación del suelo, se identificaron amplias áreas con niveles elevados de esta variable (ver anexo 6.1), lo cual muestra una estrecha relación con el tipo de cobertura vegetal del suelo.

Figura 1.

Medias de la compactación del suelo (MPa) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

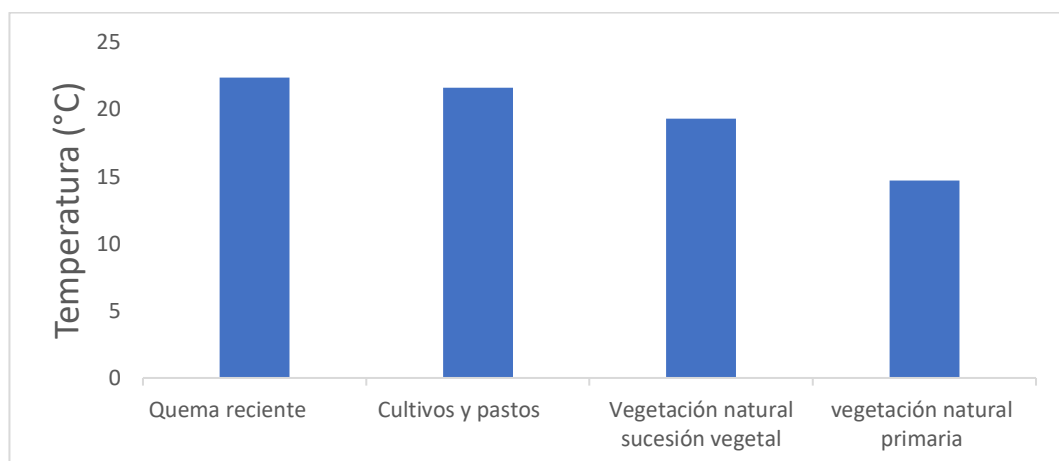
La Figura 1, muestra que las áreas con vegetación natural sucesión vegetal y aquellas afectadas por quemas recientes presentan un alto nivel de compactación de 2.7 MPa, de igual manera, las áreas dedicadas a cultivos y pastos también presentan un nivel de compactación alto de 2.02 MPa, asociadas al deterioro del suelo como consecuencia de la actividad antrópica y uso intensivo de maquinaria agrícola. En contraste, la vegetación natural primaria tiene el nivel de compactación bajo de 0.67 MPa, lo cual evidencia una mayor conservación de la estructura edáfica.

Estudios relacionados, señalan como el laboreo de los suelos con maquinaria, el sobrepastoreo, el bajo contenido de materia orgánica y el origen de los suelos. Además, establece que los indicadores de una mala salud del suelo se destacan por el encostramiento producto de la erosión y de compactación en el subsuelo (López et al., 2018).

Se concluye que las áreas con cobertura vegetal bien conservada y la acumulación constante de material vegetal mantienen una estructura de suelo más estable, con menor compactación, en cambio, las áreas alteradas por la actividad antrópica, presentan menor contenido de materia orgánica y son más propensas a compactarse.

Figura 2.

Medias de la temperatura del suelo (°C) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

La temperatura del suelo, evidenciados en la Figura 2, muestran que las áreas expuestas a una quema reciente, así como aquellas dedicadas a actividades

agropecuarias como cultivos y pastos, mostraron temperaturas promedio del suelo comparativamente más elevadas con valores de 22.33°C y 21.59°C respectivamente. En contraste, las áreas con cobertura vegetal natural primaria, se evidenció una temperatura significativamente más baja con un promedio de 14.67°C. Estas diferencias de temperaturas están directamente relacionadas con las características físicas del suelo, especialmente en su coloración predominante del suelo, y su capacidad para reflejar o absorber la radiación solar incidente, lo que se conoce como albedo. Por el contrario, un albedo bajo como el de las áreas de quema reciente calienta el suelo, porque la mayor parte de la luz es absorbida por el mismo. Los resultados observados en la presente investigación, se asocian con los obtenidos por Wang & Davidson (2007), quienes establecieron que los cambios en el albedo podrían inducir cambios significativos en el microclima.

En aquellas áreas donde se ha producido una quema reciente y los suelos que se encuentran dedicados al establecimiento de cultivos, es común observar una tonalidad más oscura en la superficie del terreno, lo cual se debe a la presencia de residuos carbonizados y a la pérdida de cobertura vegetal, lo que provoca que el suelo absorba una mayor cantidad de radiación solar. Como consecuencia, la temperatura del primer estrato del suelo tiende a incrementarse notablemente en comparación con aquellos que aún conservan con una cobertura vegetal. Esta cobertura no solo actúa como una barrera que refleja parte de la radiación solar, sino que también desempeña un papel fundamental en la protección contra la evaporación, permitiendo conservar mejor la humedad del suelo, lo que es evidente en áreas cubiertas por vegetación natural primaria. Donde el equilibrio térmico y la retención hídrica del suelo se mantienen de forma más estable, favoreciendo las condiciones propicias para el desarrollo vegetal y sostenibilidad del ecosistema.

Los resultados de la humedad del suelo, no presentaron diferencias estadísticamente significativas $p > 0.05$, lo que también está relacionado con el régimen de humedad predominante durante el periodo de evaluación en campo fueron secas; por lo que apenas se identificaron diferencias numéricas entre los distintos tipos de cobertura vegetal.

4.1.3. Estado de las propiedades químicas de los suelos productivos

Tabla 7.

Análisis de la influencia del tipo de cobertura vegetal sobre las propiedades químicas del suelo

Propiedades químicas	Tipos de cobertura (medias)				Tipos de cobertura vegetal (p-valor)
	Vegetación natural primaria	Vegetación natural sucesión vegetal	Cultivos y pastos	Quema reciente	
pH	6.33	6.7	6.75	7	0.9907
Nitrógeno total	91	29	54.46	27.67	<0.0001
Fósforo	12	13.2	33.74	31	<0.0001
Potasio	6	1.8	2.77	1	0.0008
Calcio	12.33	16.20	13.17	15.67	0.0715
Magnesio	3.33	4	3.83	6	0.3471
Zinc	6.33	4.1	4.15	3.33	0.3264
Cobre	9	11.8	14.43	15	0.0113
Hierro	337.67	218.2	208.73	194.67	<0.0001
Manganeso	10,33	12.1	9.15	17	0.0001
Relación Ca/Mg	6	5	4.07	3	0.1772
Relación Mg/K	5	5.4	4.19	7	0.0686
Relación Ca+Mg/K	34	27.7	20.86	23.33	<0.0001
Contenido de materia orgánica	12.33	6	3.6	3.67	<0.0001

*Nota: ** $p < 0.01$ = Altamente significativo; * $p < 0.05$ = Significativo; $p > 0.05$ NS = No significativo.*

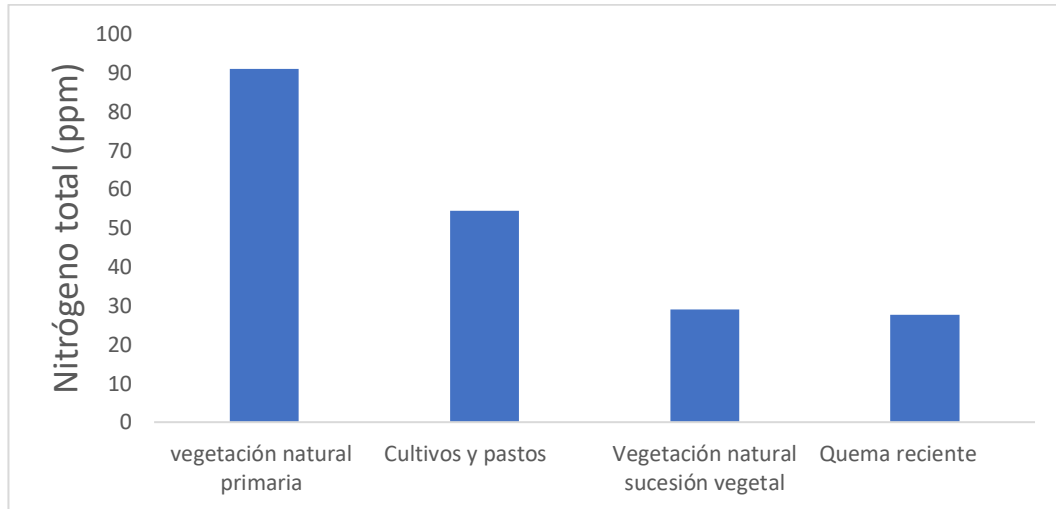
En la Tabla 7, se observa que en la cobertura vegetal dominante encontramos vegetación natural primaria con mayor concentración de las propiedades del suelo como el nitrógeno, potasio, hierro, zinc, relación Ca/Mg, Ca+Mg+K y la materia orgánica, en contraste en donde hay actividad antrópica se encuentran con mayor concentración a los elementos como el fósforo, cobre y magnesio.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de nitrógeno total, en general, presentan niveles altos, sin embargo, esto no implica necesariamente que dicho elemento se encuentre en formas disponibles para las plantas (ver anexo 6.4). En el presente estudio se evidencian diferencias en el comportamiento de esta variable según el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 3.

Medias del contenido de nitrógeno total (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

Según los resultados mostrados en la Figura 3, la vegetación natural primaria registra los niveles más altos de nitrógeno total de 91 ppm, seguida por los cultivos y pastos, que muestran una concentración moderada de 54.46 ppm. Esta disminución, es consecuencia de las actividades agrícolas y ganaderas que impactan en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, debido a la extracción de nutrientes por las cosechas y el sobrepastoreo. En contraste, las áreas de sucesión vegetal y quema reciente exhiben los niveles más bajos de nitrógeno total de 27 y 29 ppm, respectivamente. Los resultados demuestran que las áreas con cobertura vegetal conservada presentan una fertilidad del suelo significativamente mayor, debido a la presencia de vegetación densa y diversa, que aporta materia orgánica, estimula la actividad microbiana y la fijación del nitrógeno atmosférico.

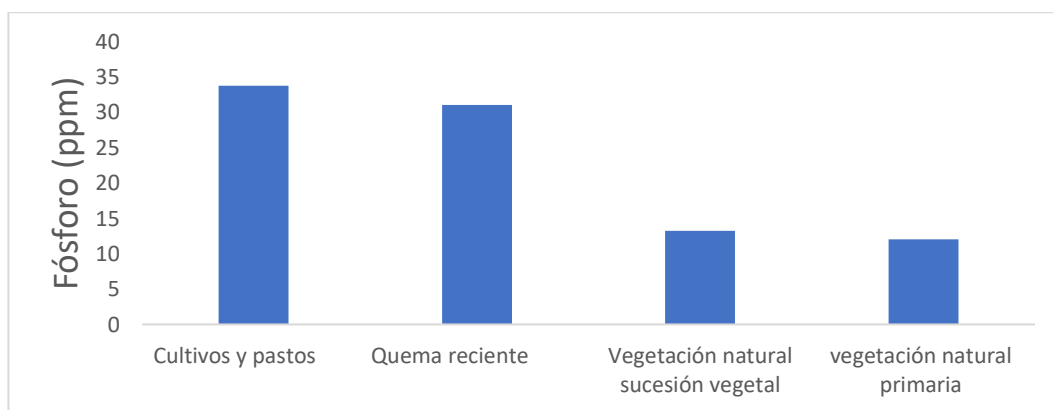
El cambio de cobertura afecta también al contenido de nitrógeno y la forma de este elemento en el suelo; las coberturas antropizadas estarían promoviendo procesos de oxidación, lo que se refleja en la disminución del valor de la relación amonio/nitrato frente a coberturas inalteradas (Quichimbo et al., 2012).

Contenido de fósforo en el suelo

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, presentan niveles altos de fósforo, sin embargo, este elemento no se encuentra en formas disponibles para las plantas, lo que limita su aprovechamiento efectivo por los cultivos (ver anexo 6.5). En el presente estudio se evidencia las diferencias ($p < 0.05$) en el comportamiento de esta variable en relación con el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 4.

Medias del contenido de fósforo (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

La Figura 4, muestra que las áreas con cobertura vegetal de cultivos y pastos presentan altas concentraciones de fósforo de 33.74 ppm, lo cual se relaciona directamente con el uso de fertilizantes. Esta tendencia también se observa en las áreas de quema reciente, donde el contenido promedio de fósforo alcanza los 31 ppm, un valor similar al registrado en las áreas cultivadas. En contraste, las áreas con cobertura vegetal natural primaria y de sucesión vegetal presentan niveles significativamente más bajos de fósforo, con valores de 12 y 13.2 ppm.

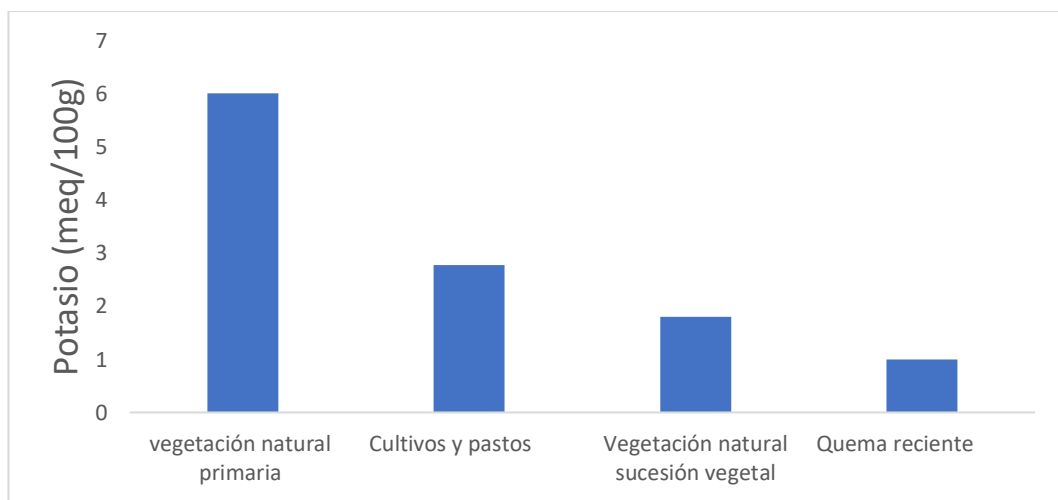
Estudios señalan que el del fósforo, tiende a incrementar en coberturas alteradas en comparación con el pajonal, lo que se corrobora con lo planteado por Farley & Kelly (2004), quienes afirman que el cambio en la vegetación ejerce poca influencia sobre el contenido de fósforo, sin embargo, como menciona Quichimbo et al., (2012), los niveles de fósforo siguen siendo bajos en relación con las cantidades requeridas para el desarrollo óptimo de los cultivos.

Contenido de potasio en el suelo

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, en general, presentan bajos niveles de potasio (ver anexo 6.6), se evidencian diferencias ($p < 0.05$) en el comportamiento de esta variable relacionándola con el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 5.

Medias del contenido de potasio (meq/100g) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

Los resultados presentados en la Figura 5, destacan la influencia de la cobertura vegetal sobre la concentración de potasio en el suelo. Las áreas con vegetación natural primaria registran la mayor concentración, con un promedio de 6 meq/100g. En contraste, los suelos intervenidos por actividades antrópicas, como cultivos y pastos, muestran una reducción con valores de 2.77 meq/100g, esta disminución es aún más pronunciada en áreas de sucesión vegetal con un valor de 1.8 meq/100g) y en aquellas áreas donde se ha realizado la quema reciente de residuos vegetales, alcanzando un valor promedio de apenas 1 meq/100g.

Las concentraciones de cationes en el bosque natural (BN) y bosque de pino (BP) reflejan esta tendencia. Cationes como el calcio, magnesio y potasio son vitales para el funcionamiento celular de las plantas y su disponibilidad está relacionada con factores como la textura del suelo y la materia orgánica (Leul et al., 2023)

Contenidos de calcio, magnesio, boro y zinc.

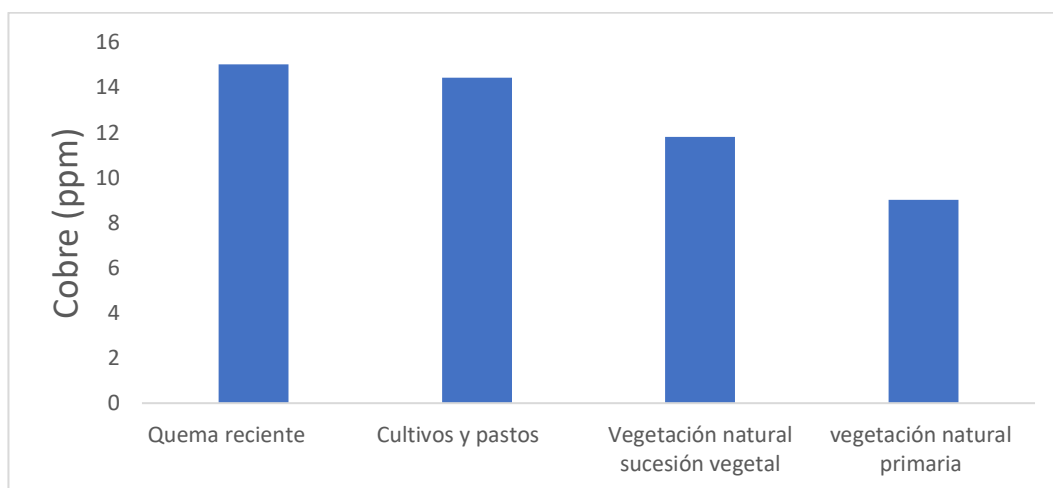
Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, presentan altos niveles de ciertos elementos, como el calcio (anexo 6.7), magnesio (anexo 6.8), boro (anexo 6.9) y zinc (anexo 6.15). Sin embargo, el análisis estadístico realizado no evidenció diferencias significativas ($p > 0.05$) que permitan establecer una relación entre la concentración de estos elementos con un tipo específico de cobertura vegetal.

Contenido de cobre en el suelo.

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, muestran altos niveles de cobre (ver anexo 6.16), con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) que relacionan el contenido cobre con un tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 6.

Medias del contenido de cobre (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

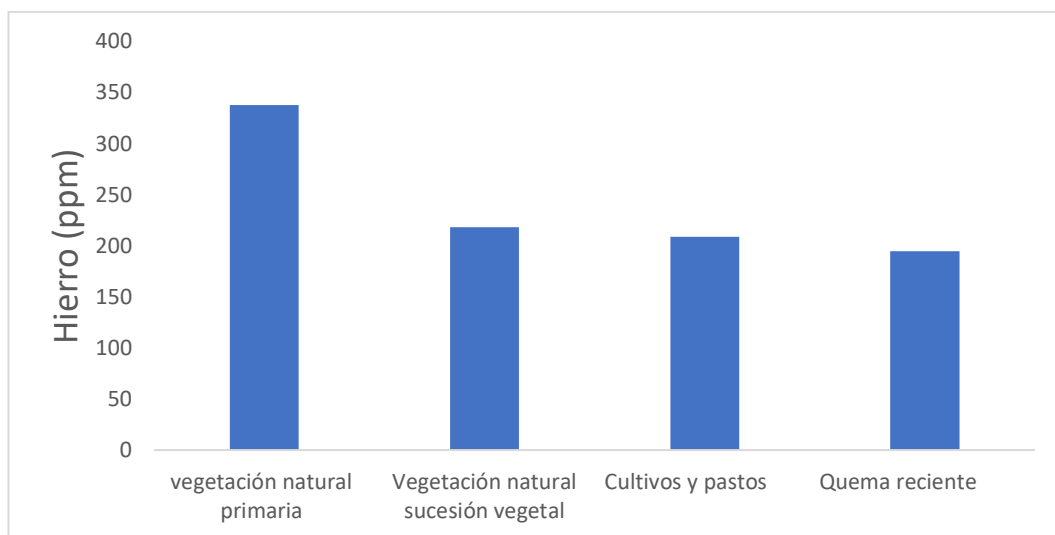
De acuerdo con la Figura 6, las áreas donde se han realizado la quema reciente, así como de aquellas dedicadas al manejo agrícola intensivo de cultivos y pastos, presentan una mayor concentración de cobre en el suelo, con valores promedio de 15 y 14.43 ppm, respectivamente, lo que se asocia a una posible acumulación asociada al uso de insumos agroquímicos. En contraste, las áreas con una vegetación natural primaria, muestran concentraciones más bajas de cobre, con una media de 9 ppm, lo que evidencia un entorno menos alterado.

Contenido de hierro

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, presentan altos niveles de hierro (ver anexo 6.14), se evidencian diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) que relaciona el contenido de hierro con el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 7.

Medias del contenido de hierro (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

De acuerdo con la información expuesta en la Figura 7, la vegetación natural primaria muestra la mayor concentración de hierro, con un promedio de 337.67 ppm. En este sentido las áreas cubiertas por una sucesión vegetal, y de cultivos y pastos presentan concentraciones promedio menores con 218.2 y 208.76 ppm, respectivamente. Las áreas recientemente sometidas a la quema reciente de los residuos vegetales registraron las concentraciones más bajas de hierro, las que se ubican con un promedio de 194.67 ppm.

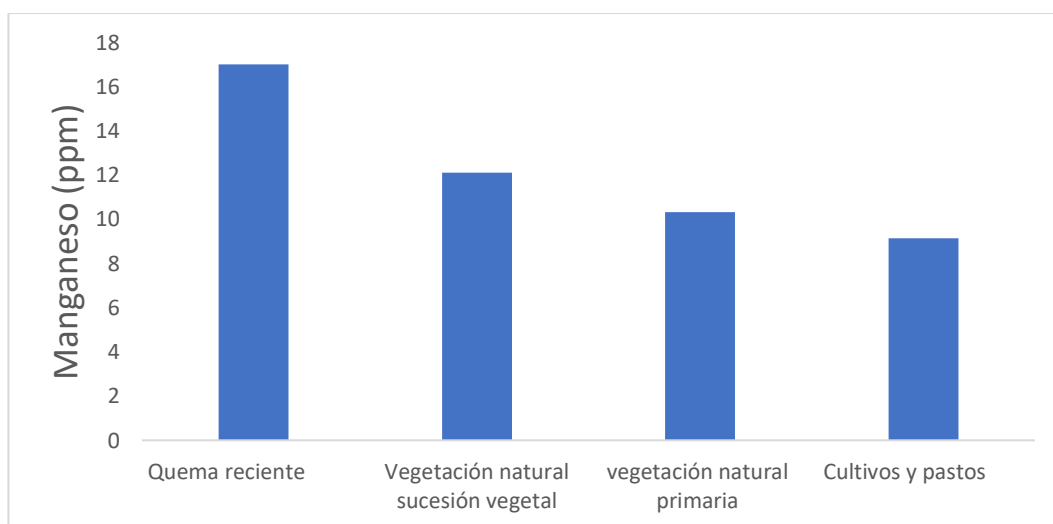
Es importante destacar el ascenso considerable en el valor del contenido de hierro en la transición de pajonal a coberturas antropizadas, donde el hierro muestra un valor muy bajo, aunque si la concentración es elevada en cambio podría llegar a niveles de toxicidad lo que se relaciona con pH ácidos que aumentaría su concentración (Quichimbo et al., 2012).

Contenido de manganeso en el suelo

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, en general, presentan altos niveles de manganeso (ver anexo 6.13), evidenciando diferencias estadísticas significativas que relacionen el contenido de manganeso con el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 8.

Medias del contenido de manganeso (ppm) influenciada por el tipo de cobertura vegetal



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

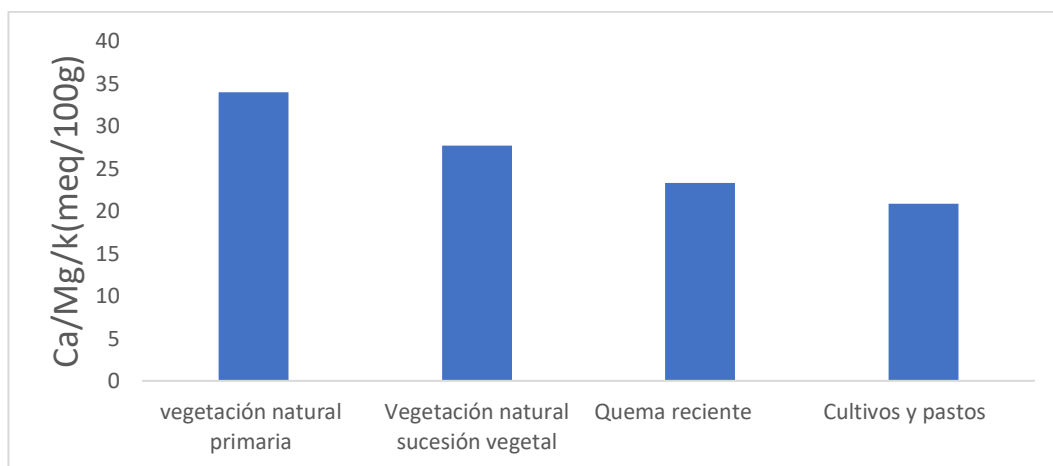
De acuerdo a los resultados presentados en la Figura 8, las áreas donde se han realizado una quema reciente presentan la mayor concentración de manganeso de 17 ppm, lo cual se atribuye a la combustión de residuos vegetales, que liberan minerales, aumentando temporalmente su disponibilidad en el suelo. En áreas con vegetación natural sucesión vegetal, la concentración disminuye a 12.1 ppm, lo que indica un proceso de recuperación de equilibrio edáfico. La vegetación natural primaria, presenta una concentración de 10.33 ppm, reflejando un sistema más estable en el que los nutrientes están integrados en los ciclos ecológicos. En contraste, los suelos dedicados a actividades agrícolas como cultivos y pastos, muestran menor concentración de manganeso de 9.15 ppm, debido al agotamiento progresivo del nutriente por la extracción continua de biomasa y la escasa reposición de materia orgánica.

Relación Ca+Mg/k en el suelo

Las áreas de producción de la parroquia Santa Fe, presentan altos niveles en la relación de Ca+Mg/K (ver anexo 6.12), con diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre los elementos, según el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 9.

Medias de la relación Ca+Mg/K influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

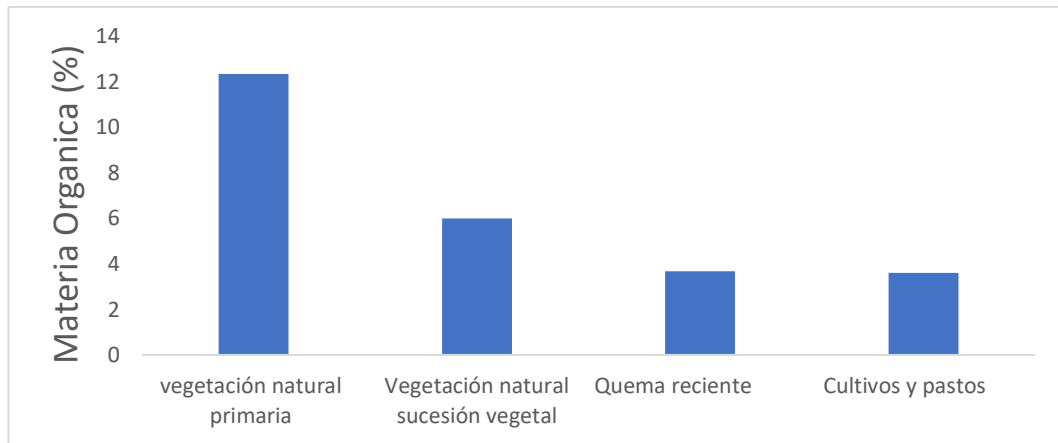
De acuerdo con la información expuesta en la Figura 9, las áreas con vegetación natural primaria presentan relaciones altas, con un valor de 34 meq/100g, lo cual indica una alta disponibilidad y un balance favorable de estos nutrientes, donde los ciclos biogeoquímicos permiten una adecuada retención y reciclaje de los elementos esenciales. En las áreas con vegetación natural de sucesión vegetal, la relación desciende a 27.7 meq/100g, la cual se encuentra asociada a procesos de regeneración del suelo. Las áreas donde se han realizado una quema reciente, la relación disminuye aún más en un 23.33 meq/100g, lo cual se debe a la pérdida de residuos vegetales y lixiviación de nutrientes tras la combustión. En contraste, los suelos dedicados a las actividades agrícolas como cultivos y pastos, presentan la relación más baja de 20.86 meq/100g, lo que refleja una mayor degradación edáfica asociada al uso intensivo del suelo, la extracción de biomasa y el uso inadecuado de fertilizante pueden desbalancear la proporción entre estos cationes esenciales, afectando la fertilidad del suelo a largo plazo.

Contenido de materia orgánica

En la parroquia Santa Fe, las áreas de producción muestran contenidos de materia orgánica de nivel medio a alto (ver anexo 6.2), con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), según el tipo de cobertura vegetal predominante.

Figura 10.

Medias del contenido de materia orgánica (MO) influenciada por el tipo de cobertura vegetal del suelo



Nota: Medias con letras iguales no son significativas por la prueba LSD de Fisher $p < 0.05$

Según los resultados mostrados en la Figura 10, las áreas con vegetación natural primaria presentan el mayor contenido de materia orgánica del 12.33 %, donde la descomposición de residuos vegetales contribuye significativamente a la fertilidad y estructura del suelo. En áreas con vegetación natural sucesión vegetal, el contenido disminuye en un 6 %, reflejando una fase de recuperación. En contraste, las áreas donde se han realizado una quema reciente, y aquellas dedicadas a cultivos y pastos, muestran los niveles más bajos de materia orgánica del 3.67 y 3.6 %, respectivamente, debido a la pérdida de biomasa por combustión, la degradación de la cobertura vegetal y la extracción de nutrientes sin una adecuada reposición.

En estudios relacionados se ha establecido que los porcentajes de MO varían significativamente, desde un 20.12 % en pastos (PO) hasta un 70.10 % en el bosque natural (BN). Este elevado contenido de materia orgánica en los suelos forestales es crucial para la fertilidad del suelo, retención de agua y aumento la capacidad de intercambio catiónico, mejorando la estructura del suelo (Gerke, 2022).

La intensa presión causada por la actividad antrópica disminuye significativamente el contenido de materia orgánica, afectando consecuentemente el contenido y disponibilidad de nutrientes debido a la pérdida de la diversidad microbiana.

4.1.4. Recomendaciones del plan de fertilización para el cultivo de trigo

Con el fin de recomendar un plan de manejo del suelo que optimice el cultivo de trigo en la parroquia Santa Fe, se establecieron formulaciones específicas para el uso de fertilizantes químicos, basadas en los requerimientos nutricionales del cultivo y en los análisis de suelo realizados. Estas formulaciones se sustentan en trabajos desarrollados por el Instituto Internacional de Nutrición Vegetal (INPI), que establecen que para alcanzar un rendimiento de 4 Tm ha⁻¹, una superficie de una hectárea absorbe: nitrógeno (104 kg ha⁻¹), fósforo (17 kg ha⁻¹) potasio (66 kg ha⁻¹), calcio (10 kg ha⁻¹) y magnesio (14 kg ha⁻¹). Considerando estos requerimientos, y tras un estudio de las principales fuentes de fertilizantes disponibles en Guaranda y utilizadas por los agricultores locales, se definieron recomendaciones orientadas a cubrir eficientemente las demandas del cultivo.

Tabla 8.

Primera recomendación de uso de fertilizantes comerciales

Fuentes	Cantidad kg ha ⁻¹	Aporte por elemento kg ha ⁻¹					P. Total
		N	P	K	Ca	Mg	
Yara Mila INTEGRADOR	188.98	28.33	17	37.78	0	3.4	\$200.32
Nitrato de Potasio	71.6	9.33	0	28.22	0	0	\$157.52
Sulfato de Calcio	50	0	0	0	10	0	\$12.00
Sulfato de Magnesio	108.16	0	0	0	0	10.6	\$54.08
Urea	144.26	66.36	0	0	0	0	\$80.79
	TOTAL						\$516.70

El producto Yara Mila Integrador es fertilizante granulado complejo que aporta: NPK (15-9-20) enriquecido con Magnesio (1.8%), Azufre (3.8%) y microelementos como; Boro (0.015%), Manganeso (0.02%), y Zinc (0.02%). Se requiere de 188.98 kg ha⁻¹, que aportaran 28.33 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 17 kg ha⁻¹ de fósforo y 37.78 kg ha⁻¹ de potasio, con una reacción es ligeramente ácida a neutra. También se complementa el nitrato de potasio, que aporta el 13.7 % de nitrógeno nítrico y un

46% de potasio como K_2O ; se requieren de 71.6 kg ha^{-1} , los que aportan 28.22 kg ha^{-1} de potasio y 9.33 kg ha^{-1} de nitrógeno, con una reacción ligeramente alcalina. Además, se incorpora el sulfato de calcio, cuya formulación aporta un 20%, se requiere de 50 kg ha^{-1} , que aportan 10 kg ha^{-1} de calcio, y sulfato de magnesio, que aportan el 9.8%; se requiere de $108.16 \text{ kg ha}^{-1}$, que aportan 10.6 kg ha^{-1} de magnesio; ambos con una reacción ligeramente ácida a neutra. Finalmente, se incorpora la urea, que aporta un 46% de nitrógeno; se requiere de $144.26 \text{ kg ha}^{-1}$, que aporta 66.36 kg ha^{-1} de nitrógeno, con una reacción ligeramente alcalina. En total, se invierten \$516.70

Tabla 9.

Segunda recomendación de uso de fertilizantes comerciales

Fuentes	Cantidad kg ha^{-1}	Aporte por elemento kg ha^{-1}					
		N	P	K	Ca	Mg	P. Total
Bonanza	188.89	35.89	17	35.89	1.89	0	\$207.78
Muriato de Potasio	50.18	0	0	30.11	0	0	\$35.13
Oxido de Calcio	11.1	0	0	0	8.11	0	\$2.44
Sulfato de Magnesio	142.86	0	0	0	0	14	\$71.43
Urea	148.07	68.11	0	0	0	0	\$82.92
	TOTAL						\$399.70

El producto bonanza es un fertilizante granulado que aporta macronutrientes como NPK (15-15-15) enriquecido con microelementos (Ca, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), en la recomendación se requiere que se incorpore $188.98 \text{ kg ha}^{-1}$, con los que se aportan 35.89 kg ha^{-1} de nitrógeno, 17 kg ha^{-1} de fósforo y 35.89 kg ha^{-1} de potasio, también aporta calcio en un 1.89 kg ha^{-1} . Además, dentro de la recomendación se incorpora el muriato de potasio, cuya formulación que aporta 60% de potasio, es un fertilizante solido de aspecto blanco cristalino o ligeramente rojizo, al incorporarse al suelo tiene una reacción ligeramente ácida a neutra, dentro de la formulación recomendada se requiere 50.18 kg ha^{-1} de fertilizante que aportan 30.11 kg ha^{-1} de potasio. También se incorpora como fuente al óxido de calcio, que aporta el 90%, es un fertilizante sólido de aspecto blanco, al ser incorporado en el suelo tiene una reacción alcalina, cuya formulación requiere 11.1 kg ha^{-1} , los que aportan 8.11 kg ha^{-1} de calcio. Por consiguiente, se incorpora como fuente el sulfato de magnesio, los que aportaran 9.8% de magnesio, es un fertilizante solido de aspecto blanco

cristalino, que al ser incorporado en el suelo tiende a presentar una reacción ligeramente ácida a neutra, cuya formulación propuesta requiere de 142.86 kg ha⁻¹, los que aportaran 14 kg ha⁻¹ de magnesio. Finalmente, se debe incorporar como fuente a la urea, que aportará un 46% de nitrógeno, es un fertilizante sólido de aspecto cristalino blanco, que al ser incorporado en el suelo tiende a presentar una reacción ligeramente alcalina, cuya formulación requiere de 148.07 kg ha⁻¹, los que aportaran 68.11 kg ha⁻¹ de nitrógeno. El costo total de la inversión para la aplicación de la segunda recomendación es de \$399.70.

Tabla 10.

Tercera recomendación de uso de fertilizantes comerciales

Fuentes	Cantidad kg ha ⁻¹	Aporte por elemento kg ha ⁻¹					P. Total
		N	P	K	Ca	Mg	
14/14/12	121.43	17	17	14.5	0	0	\$94.72
Nitrato de potasio	114.44	14.88	0	51.5	0	0	\$256.35
Sulfato de calcio	50	0	0	0	10	0	\$24.00
Sulfato de Magnesio	142.86	0	0	0	0	14	\$71.43
Urea	156.78	72.12	0	0	0	0	\$87.80
TOTAL							\$534.29

El fertilizante granulado (NPK 14-14-12) aporta macronutrientes, con una reacción ligeramente ácida a neutra al implementarlo en el suelo; se recomienda aplicar 121.43 kg ha⁻¹, cuya formulación proporciona 17 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 17 kg ha⁻¹ de fósforo y 14.5 kg ha⁻¹ de potasio. Además, se incorpora, la fuente al nitrato de potasio, es un fertilizante sólido de aspecto cristalino blanco, que al ser incorporado en el suelo se manifiesta con una reacción ligeramente alcalina, cuya formulación aporta un 13.7% de nitrógeno nítrico y 46% de potasio (K₂O); se requieren de 114.44 kg ha⁻¹, aportando 51.5 kg ha⁻¹ de potasio y 14.88 kg ha⁻¹ de nitrógeno. También se añade como fuente al sulfato de calcio, el cual es un fertilizante sólido de color blanco a grisáceo, al ser incorporado en el suelo tiene una reacción ligeramente ácida a neutra, se requieren de 50 kg ha⁻¹, para aportar 10 kg ha⁻¹ de calcio. Como fuente se utiliza sulfato de magnesio 9.8%, es un fertilizante sólido de aspecto blanco cristalino, que al ser incorporado en el suelo tiene una reacción ligeramente ácida a neutra, en base a la recomendación se requiere de 142.86 kg ha⁻¹, cuya formulación aporta 14 kg de magnesio. Finalmente, se incluye como fuente

a la urea cuya formulación aporta un 46%, es un fertilizante sólido de aspecto cristalino blanco, que al ser incorporado en el suelo tienen una reacción ligeramente alcalina, en base a la recomendación se requieren de 156.78 kg ha⁻¹ para aportar 72.12 kg ha⁻¹ de nitrógeno. El costo total de la aplicación de esta recomendación representa una inversión total de \$534.29.

Tabla 11.

Cuarta recomendación de uso de fertilizantes comerciales

Fuentes	Cantidad kg ha ⁻¹	Aporte por elemento kg ha ⁻¹					P. Total
		N	P	K	Ca	Mg	
10-30-10	56.67	5.67	17	5.67	0	0	\$34.00
Muriato de potasio	100.55	0	0	60.33	0	0	\$70.39
Óxido de Calcio	11.11	0	0	0	10	0	\$2.44
Sulfato de Magnesio	142.86	0	0	0	0	14	\$71.43
Nitrato de Amonio	289.21	98.88	0	0	0	0	\$173.53
TOTAL							\$351.79

El producto es un fertilizante sólido que proporciona NPK (10-30-10); se requiere 56.67 kg ha⁻¹, que aporta 5.67 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 17 kg ha⁻¹ de fósforo y 5.67 kg de potasio, con una reacción ligeramente ácida a neutra. Adicionalmente se incorpora el muriato de potasio que aporta el 60%; se requiere 100.55 kg ha⁻¹, que aportan 60.33 kg ha⁻¹ de potasio, con una reacción ligeramente ácida a neutra, dentro de la formulación recomendada. Complementario se integra el óxido de calcio que aporta el 90%; se requiere 11.11 kg ha⁻¹ de fertilizante que aporta 10 kg de calcio al suelo. Además, se utiliza como fuente al sulfato de magnesio que aporta 9.8%, es un fertilizante sólido de aspecto blanco cristalino, se requieren de 142.86 kg ha⁻¹ para aportar 14 kg ha⁻¹ de magnesio, con una reacción es ligeramente ácida a neutra. Y complementar con el nitrato de amonio sólido cuya formulación aporta un 34%, de aspecto cristalino blanco o ligeramente amarillento, que al incorporarse en soluciones al suelo tiene una reacción ligeramente ácida a neutra que asimila la planta en forma de nitrato (NO₃⁻ y amonio (NH₄⁺), en la recomendación se requieren 289.21 kg ha⁻¹ de fertilizante que aportan 98.88 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Esta combinación asegura una fertilización equilibrada del cultivo, con un costo total de \$351.79 por hectárea.

Tabla 12.*Quinta recomendación de uso de fertilizantes comerciales*

Fuentes	Cantidad kg ha ⁻¹	Aporte por elemento kg ha ⁻¹					Inversión	
		N	P	K	Ca	Mg	P. Unitario	P. Total
15-15-15	113.33	17	17	17	0	0	\$0.60	\$68.00
Sulfato de Potasio	118.29	0	0	49	0	0	\$2.24	\$264.97
Sulfato de Calcio	50	0	0	0	10	0	\$0.48	\$24.00
Sulfato de Magnesio	142	0	0	0	0	14	\$0.50	\$71.00
Urea	189.13	87	0	0	0	0	\$0.56	\$105.91
TOTAL								\$533.88

El NPK (15-15-15) es un fertilizante granulado de aspecto grisáceo que aporta macroelementos que al incorporarse en el suelo su reacción es ligeramente ácida a neutra; se requiere que se incorporen 113.33 kg ha⁻¹, con los que se aportan 17 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 17 kg ha⁻¹ de fósforo y 17 kg ha⁻¹ de potasio. También se incorpora como fuente al sulfato de potasio, que aporta un 51%, de aspecto solido cristalino blanco, que tiene una reacción neutra a ligeramente alcalina, lo que se requieren de 118.29 kg ha⁻¹, los que aportaran 49 kg ha⁻¹ de potasio. Además, se incorpora como fuente al sulfato de calcio, cuya formulación aporta un 20% de calcio, es un fertilizante sólido de aspecto blanco a grisáceo, tiende a presentar una reacción ligeramente ácida a neutra, cuya formulación propuesta requiere de 50 kg ha⁻¹, los que aportaran 10 kg ha⁻¹ de calcio. Por consiguiente, se incorpora como fuente el sulfato de magnesio, los que aportaran 9.8% de magnesio, fertilizante sólido de aspecto blanco cristalino, presenta una reacción ligeramente acida a neutra, cuya formulación propuesta requiere de 142 kg ha⁻¹, los que aportaran 14 kg ha⁻¹ de magnesio. También, se debe incorporar como fuente a la urea, que aportará un 46% de nitrógeno, es un fertilizante sólido de aspecto cristalino blanco, presenta una reacción ligeramente alcalina, cuya formulación requiere de 189.13 kg ha⁻¹, los que aportaran 87 kg ha⁻¹ de nitrógeno. En total, se invierten \$533.88 en esta recomendación.

4.2. Comprobación de la hipótesis

De acuerdo a los resultados estadísticos de las variables evaluadas en esta investigación, el estado de la cobertura vegetal del suelo en las áreas de producción, influye sobre las propiedades físico-químicas del mismo. Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (H_0), debido a que los datos obtenidos nos indican que existen diferencias significativas.

CAPÍTULO V

5.1.CONCLUSIONES

- La parroquia Santa Fe, con una superficie de 2691 ha dedicadas cultivo de trigo y el maíz suave, presentan niveles medios a altos de nitrógeno total en un 71%, y niveles medios a muy altos de fósforo en un 85.6 %, mientras que el potasio presenta niveles medios a muy altos en un 98.1 %. En cuanto a los micronutrientes, se registró niveles medios a altos de calcio del 100%, también, niveles altos de magnesio, zinc, hierro, y manganeso del 100%, respectivamente, y niveles altos a muy altos de boro en el 100%. Además, el 73 % de la superficie presenta niveles medios a bajos de materia orgánica, lo cual puede restringir la actividad microbiana y afectar el ciclo de los nutrientes.
- Las propiedades físicas del suelo están influenciadas por el tipo de cobertura dominante, en áreas con vegetación natural primaria, evidencian una baja compactación del suelo de 0.67 MPa, temperaturas más bajas de 14.67°C, y un mayor contenido de humedad de 37.33%; contrastando con áreas intervenidas donde se muestran altos niveles de compactación, con un rango de 2.02 a 2.7 MPa, altas temperaturas con un rango de 19.3 a 22.33 °C, y menores contenidos de humedad con un rango de 30.3 a 36.1%.
- Las propiedades químicas del suelo están influenciadas por el tipo de cobertura vegetal dominante, las áreas con vegetación natural primaria presentan niveles altos para los elementos como el nitrógeno total (91 ppm), potasio (6 meq/100g), hierro (337.67 ppm), y una alta relación de calcio, magnesio sobre potasio (34 meq/100g), asociado a que en dichas áreas no ha existido la presión de actividades productivas, lo que permiten que los ciclos de nutrientes se mantengan estables.
- En este estudio se determinó que en las áreas donde se han desarrollado actividades productivas, se registran altos contenidos de fósforo (33.74 ppm), cobre (14.33 ppm), y manganeso (6 ppm); lo que se relacionan con la incorporación de fertilizantes que aportan grandes cantidades de dichos

elementos, como es el caso del Fosfato Diamónico, lo podría provocar desequilibrios en la solución del suelo, favoreciendo la acumulación de otros macro y microelementos.

- De acuerdo con el estudio del suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo de trigo, se han establecido cinco planes de fertilización que consideran diversas fuentes y costos económicos, orientada a cubrir los requerimientos de todos los nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, para alcanzar un rendimiento estimado de 4 toneladas por hectárea, los cuales servirán como una referencia para zona de estudio.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda extender el análisis de las propiedades físicas y químicas de los suelos a otras áreas de producción de cereales para establecer contrastes respecto del comportamiento de las mismas; además de que se replique el análisis dentro de la misma parroquia cada 5 años con la finalidad de que determine una posible variabilidad temporal.
- Se recomienda establecer un ensayo que permita validar el uso de enmiendas químicas y orgánicas que permitan corregir el desbalance entre las relaciones de los elementos potasio, calcio y magnesio; además de un ensayo que evalúe el impacto de acciones tendientes a reducir la compactación del suelo y revertir la pérdida de la cobertura vegetal.
- Se recomienda enfáticamente priorizar la implementación de la formulación 4 para una superficie de 1 ha, fuentes como: 10-30-10 (56.67 kg), Muriato de potasio (100.55 kg), Óxido de Calcio (11.11 kg), Sulfato de Magnesio (142.86 kg) y Nitrato de Amonio (289.21 kg), dentro de los planes de uso de fertilización, considerando su relación beneficio- costo en comparación con otras formulaciones disponibles en el mercado, esta elección busca maximizar la eficiencia en el aporte de nutrientes esenciales, para así propender a un equilibrio económico favorable para el productor. Cabe destacar que el costo estimado de esta formulación corresponde al año de investigación, por lo que puede estar sujeto a variaciones en función del tiempo y las condiciones del mercado.

BIBLIOGRAFÍA

- Altamirando, E. (2019). Parámetros físicos y químicos para la determinación de la calidad de los suelos en la microcuenca Jun-Jun. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/fbdb0d01-fdf4-4cc5-81c1-e0b57267d8b0/content>
- Barrera, A. (2021). Importancia del manejo de suelos en la sostenibilidad agrícola. *Revista Semilla del Este*, 2(1), 28-39.
- Burga, N. (2023). Influencia de la cobertura vegetal en las propiedades físicas, químicas y contenido de materia orgánica del suelo del bosque montano La Palma, Chota, 2022. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. Recuperado de: <https://repositorio.unach.edu.pe/server/api/core/bitstreams/385d82e0-d170-44eb-af33-61bf444c452b/content>
- Burítica, A. (2022). Enmiendas agrícolas. Recuperado de: <https://blog.croper.com/enmiendas-agricolas/>
- Cabrera, K. (2022). Eficiencia del Subsolador para la preparación de suelo, y su beneficio en los. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Recuperado de: <https://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/13186/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON000444.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chaparro, R., Castillo, A., & Heredia, C. (2017). Clasificación taxonómica del suelo. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/5d8be5a6-da16-4e28-ad7c-602ea2319bf7/download>
- Chela, E. (2018). Evaluación de la pérdida del suelo por erosión hídrica en tres sistemas de producción en la microcuenca de la quebrada Chilcapamba, cantón Chillanes, provincia Bolívar. [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal de Bolívar]. Recuperado de: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/151/1/iniapsctCh516e.pdf>
- Colazo, J., Scherger, E., Torregrosa, R., Álvarez, C., & Almirón, S. (2023). Riesgo de erosión eólica en diferentes sistemas productivos del sur de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 41(2), 213-222.
- Del Rey, I. (2025). Diagrama de Muller – Relación entre nutrientes. Recuperado de: <https://www.tiloom.com/relacion-entre-nutrientes-diagrama-de-mulder/>

bosques piemontanos y montanos bajos del macizo de El Cajas, provincia del Azuay. [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. Recuperado de: <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/4537059a-2e06-4971-a3a9-7f6db45e2077/content>

Guamán, P., César, B., & Mármol, J. (2023). Ventajas de la aplicación de cobertura vegetal en los cultivos agroecológicos. *Redilat*, 4(2). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.1032>

Gutiérrez, L. (2020). Manejo sostenible del suelo. Recuperado de: <https://es.linkedin.com/pulse/manejo-sostenible-del-suelo-lourdes-guti%C3%A9rrez#:~:text=En%20un%20sistema%20de%20manejo,aumenten%20la%20armon%C3%ADa%20del%20ecosistema.>

Hernández, A., Vera, L., Naveda, C., Veliz, F., Guzmán, A., Vivar, M., León, R. (2022). Tipos de suelos y sus características de las partes medias y bajas de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador. *ESPAMCIENCIA*, 3(1), 87-97. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9138903>

Hernández, C., & Barrera, K. (2018). Descubrimiento químico de los macronutrientes vegetales. *Revista Científica Tecnológica*, 1(2), 25-28.

Hernández, J., Gutiérrez, F., Serrato, R., González, A., & García, E. (2021). Manejo nutricional integrado: herramienta clave para la agricultura sostenible. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 885-897.

Holdridge, L., (1979). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). Recuperado de: <https://hdl.handle.net/11324/7936>.

Industrias Químicas Fervalle (FERVALLE). (2023). Tipos de barbecho. Recuperado de: https://www.fervalle.com/que-es-barbecho-para-que-cultivos-se-utiliza/?srsltid=AfmBOopetsNvOyddnnqAho1C3A0SXeCcyCCNS165Eda1kN7K2Kk2_e-N

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021). Clasificación de las tierras por capacidad de uso. Recuperado de: https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc05-02_clasificacion_de_las_tierras_por_su_capacidad_de_uso.pdf

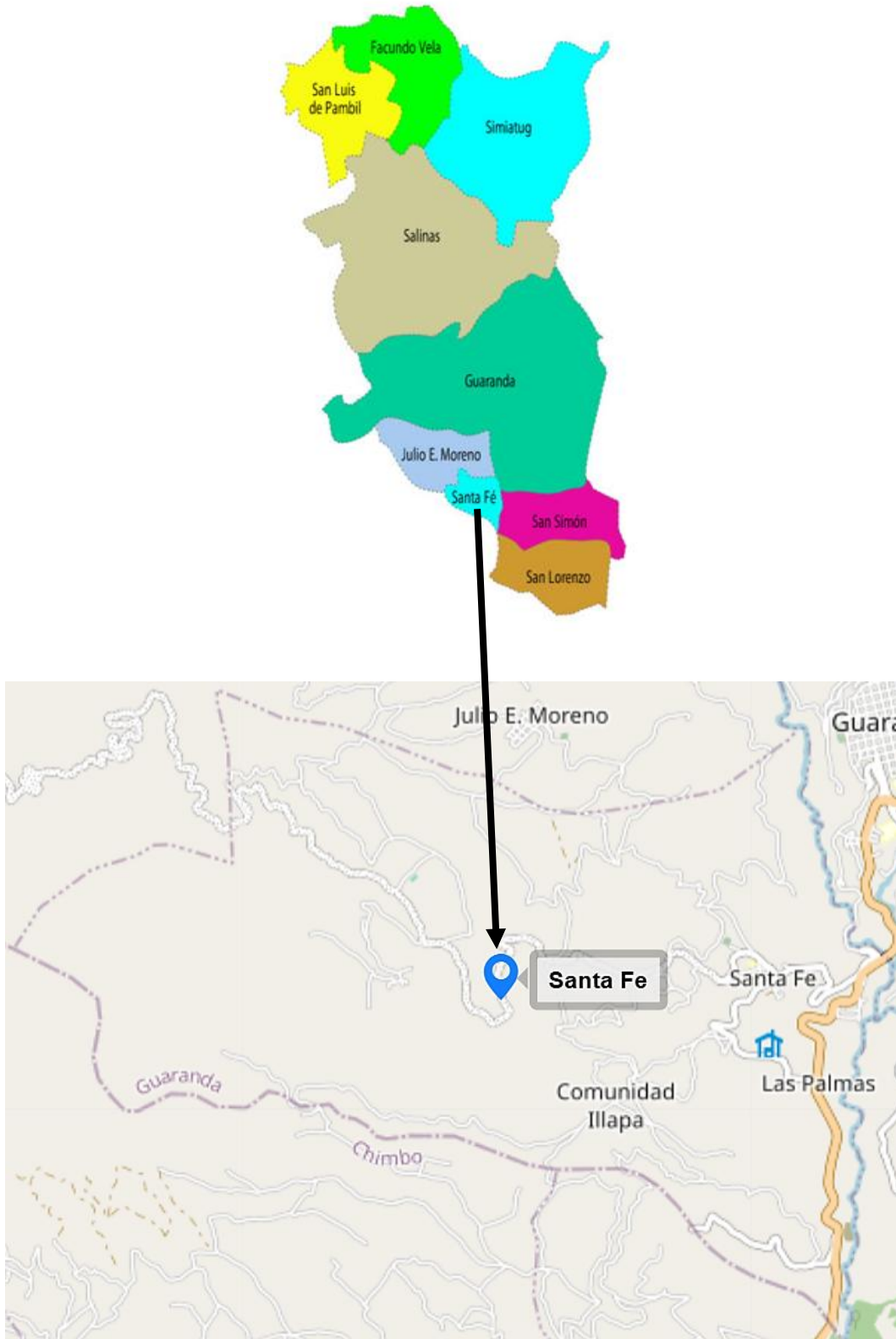
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2021). Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. Recuperado de: <https://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/capacidad-uso-tierras.pdf>
- INTAGRI. 2017. Fijación de Potasio en el Suelo. Serie Suelos Núm. 31. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p.
- Leul, Y., Assen, M., Damene, S., & Legass, A. (2023). Effects of land use types on soil quality dynamics in a tropical sub-humid ecosystem, western Ethiopia. *Ecological Indicators*, 147, 110024.
- Licona, L. (2019). Barbecho como práctica cultural: una revisión histórica y alcances frente a la sostenibilidad. *Luna Azul*, 21-37.
- Lince, L., & Sadeghian, S. (2021). Taxonomía de suelos. Consideraciones para la zona cafetera de Colombia. *Boletín Técnico Cenicafe*, 1-31.
- López Báez, Walter, Reynoso Santos, Roberto, López Martínez, Jaime, Camas Gómez, Robertony, & Tasistro, Armando. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 65-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>
- Moreno, R., & Ibañez, A. (2020). Soil Taxonomy: Principios de clasificación de los suelos. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/146033>
- Natural Resources Conservation Service (USDA). (2022). Recuperado de: <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/mollisols>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). Recuperado de: <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). Recuperado de: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/#:~:text=La%20Capacidad%20de%20Intercambio%20Cati%C3%B3nico,K%2C%20NH4%20etc.>

- Pachés, M. (2020). Degradación de suelos. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Valencia]. Recuperado de: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/142676/Pach%*c3%a9s%20-%20Degradaci%*c3%b3n%20de%20suelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y**](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/142676/Pach%c3%a9s%20-%20Degradaci%c3%b3n%20de%20suelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Pérez, W., Flores, R., Calero, E., Arévalo, Y., & Solórzano, R. (2024). Manual de aplicación de enmiendas para suelos salinos y sódicos. In urn: isbn: 978-9972-44-164-6. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Ramón, A., & Bollo, M. (2023). El índice de antropización de la cubierta vegetal como medida de la antropización de áreas naturales protegidas: Caso Pico Azul-La Escalera, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(2).
- Rationally Regenerated Soil (RRS). (2023). Textura del suelo. Recuperado de: <https://rrsoil.com/la-importancia-de-la-textura-en-el-suelo/#:~:text=La%20textura%20es%20uno%20de,retenci%C3%B3n%20de%20agua%20y%20nutrientes>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADR). (2022). El fuego ya no es una alternativa. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-fuego-ya-no-es-una-alternativa>.
- Simón, M. & Golik, S. (2022). Trigo: fertilización y rotaciones. Recuperado de: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/154685/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sistemas de información geográfica (GIS). (2024). Referencia espacial. Recuperado de: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/kriging.htm>
- Tinal, S., LÓPEZ, J., Zavala, J., Salgado, S., Palma, J., & Hidalgo, I. (2020). Degradación química en Acrisoles bajo diferentes usos y pendientes en la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agro Productividad*, 13(2).

- Wang, S., & Davidson, A. (2007). Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(2-4), 133-142.
- Zamora, P., Rico, V., Ramírez, L.N.G., Barrientos, R.C., Plasencia, A.H., Villegas, P., Domínguez, M. del R., & Gutiérrez, C. (2018). Composición y estructura de la vegetación secundaria en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, (45), 57-74. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.5>
- Zárate, W., Felipe, M., Martínez, F., Móreno, K., Arispe, J., & Díaz, J. (2024). Propiedades químicas del suelo y calidad del agua en Miahuatlán de Porfirio Díaz y Ejutla de Crespo, Oaxaca, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(1).

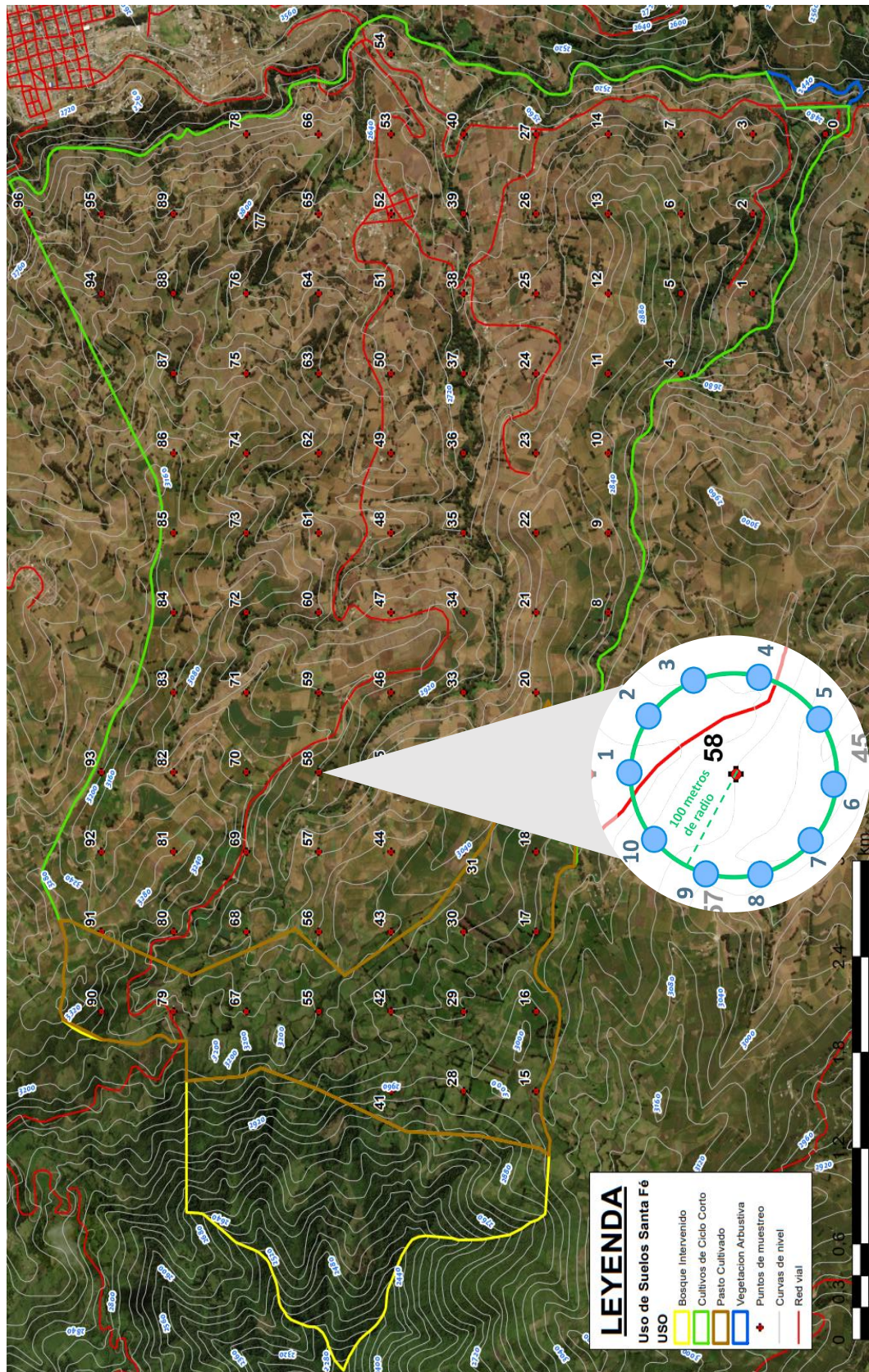
ANEXOS

Anexo 1. Mapa de ubicación de la investigación.



Fuente: Ubica Ecuador

Anexo 2. Croquis de la distribución espacial de las muestras en el territorio.



Anexo 3. Bases de datos.

IDENTIFICACIÓN	pH_Lab	N (ppm)	P (ppm)	K (meq/100g)	Ca (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Σ Bases (meq/100g)	MO (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Comp (MPa)	Temp °C	Hum %	Cobertura
No. 1	7,02	7,47	57,96	0,77	15,86	4,97	3,7	12,9	135	10,7	3,19	6,46	27,07	21,61	2,79	38	35	27	1,26	16	36	2
No. 2	6,79	3,09	14,41	0,75	15,18	5,59	4,5	14,5	141	13,2	2,72	7,41	27,55	21,52	3,89	32	31	37	2,48	22	34	2
No. 3	6,81	1,18	16,36	0,85	11,57	4,31	2,7	16,1	149	7,3	2,69	5,04	18,57	16,73	2,48	36	29	35	1,98	29	27	2
No. 4	6,64	0,54	16,16	1,43	13,37	4,83	3,4	13,0	242	14,0	2,77	3,38	12,73	19,63	4,02	30	35	35	4,21	25	28	5
No. 5	6,68	41,94	34,65	0,76	18,48	4,37	4,2	15,4	224	9,3	4,23	5,78	30,25	23,60	3,60	34	35	31	0,96	25	27	2
No. 6	6,52	13,11	37,73	0,94	16,72	3,34	4,7	15,5	205	8,6	5,01	3,56	21,40	20,99	3,39	32	35	33	1,29	19	29	2
No. 7	6,53	32,77	66,53	1,17	13,38	4,49	5,4	12,5	204	12,3	2,98	3,84	15,29	19,04	3,10	38	37	25	2,11	23	27	2
No. 8	6,50	112,49	58,58	1,17	10,68	3,21	4,9	14,1	261	9,1	3,33	2,75	11,92	15,05	3,44	37	37	26	1,88	20	27	2
No. 9	6,30	130,23	60,99	1,01	9,97	2,98	5,2	16,6	323	7,9	3,35	2,96	12,85	13,95	3,24	33	37	30	1,98	20	30	2
No. 10	6,77	23,49	19,80	1,09	9,10	4,33	4,9	21,7	205	5,7	2,10	3,95	12,27	14,53	2,05	39	33	28	2,77	22	28	2
No. 11	6,57	130,67	39,01	0,90	11,43	3,12	4,0	18,2	327	6,2	3,67	3,47	16,18	15,45	3,36	37	33	30	0,98	18	28	2
No. 12	6,42	15,64	21,10	0,72	13,75	3,62	3,5	16,4	227	6,9	3,80	5,07	24,30	18,09	2,96	34	33	33	1,84	23	33	2
No. 13	6,47	46,21	17,78	0,88	14,27	4,42	3,0	15,4	278	14,7	3,23	5,01	21,19	19,57	3,96	36	35	29	2,71	23	34	2
No. 14	6,65	69,98	37,96	1,01	15,13	4,64	2,9	14,4	207	16,2	3,26	4,58	19,52	20,78	3,52	34	37	29	3,33	25	26	3
No. 15	6,00	39,92	11,12	0,39	17,92	2,04	6,3	6,7	277	10,3	8,78	5,25	51,29	20,35	12,10	47	35	18	1,26	20	41	2
No. 16	6,07	52,60	16,25	0,84	16,85	2,83	4,0	17,7	414	14,6	5,96	3,37	23,44	20,52	5,56	39	33	28	2,26	25	37	2
No. 17	6,69	7,20	24,43	1,07	19,08	4,91	5,2	18,6	241	22,3	3,88	4,58	22,35	25,07	3,81	32	31	37	1,91	21	28	3
No. 18	6,28	50,08	29,71	1,11	16,54	2,87	6,1	16,0	391	18,0	5,77	2,58	17,45	20,52	4,32	34	37	29	2,09	20	27	2
No. 19	6,29	34,33	18,33	0,55	13,02	2,40	3,0	14,5	243	11,5	5,43	4,34	27,92	15,97	2,81	39	33	28	1,58	17	32	2
No. 20	6,46	25,78	32,77	0,88	21,48	3,41	3,8	16,7	231	14,0	6,30	3,86	28,14	25,77	3,54	39	31	30	2,80	18	32	2
No. 21	6,54	6,93	35,28	1,18	15,14	4,08	6,7	15,6	138	10,7	3,71	3,44	16,23	20,40	2,22	49	27	24	1,29	19	34	2

No. 22	6,70	109,81	34,28	0,76	10,72	3,95	3,8	19,4	224	5,7	2,72	5,21	19,37	15,42	2,77	39	33	28	2,08	27	27	2
No. 23	6,69	70,15	24,95	0,96	8,93	4,07	2,7	15,8	156	6,6	2,19	4,25	13,57	13,95	2,45	37	35	28	2,06	17	33	2
No. 24	6,75	79,87	63,46	1,08	10,61	3,84	3,1	16,5	138	7,8	2,77	3,55	13,38	15,53	2,53	39	29	32	4,21	29	24	2
No. 25	6,93	2,03	64,65	1,11	13,30	4,00	5,3	14,7	167	10,6	3,33	3,61	15,62	18,41	2,64	40	33	27	2,11	24	30	2
No. 26	7,06	9,56	27,85	0,67	14,32	5,09	3,5	13,8	139	18,9	2,81	7,61	29,03	20,08	2,81	40	33	27	2,06	21	32	2
No. 27	6,75	5,87	30,66	0,73	12,66	7,65	2,5	12,4	136	13,1	1,66	10,53	27,96	21,03	2,70	38	35	27	2,99	21	37	3
No. 28	6,14	46,06	8,13	0,34	14,2	1,46	7,2	9,8	367	5,6	9,70	4,30	46,00	16,00	12,63	41	41	18	1,33	19	39	2
No. 29	5,93	47,79	13,12	0,24	19,13	1,24	5,1	6,9	339	3,2	15,37	5,21	85,26	20,61	11,08	41	41	18	1,42	26	36	2
No. 30	6,11	71,81	10,75	0,45	20,31	2,37	5,1	6,7	338	5,1	8,57	5,27	50,43	23,13	10,22	39	47	14	0,98	16	34	2
No. 31	6,21	69,00	29,34	1,1	18,58	2,86	5,0	13,6	370	8,4	6,50	2,60	19,50	22,54	4,23	37	35	28	1,91	18	31	2
No. 32	6,50	130,09	27,05	0,92	8,51	3,33	2,9	17,4	206	4,7	2,55	3,61	12,82	12,77	2,71	39	33	28	1,11	27	33	2
No. 33	7,12	4,07	27,42	1,42	20,93	5,07	4,0	10,9	138	25,7	4,13	3,57	18,29	27,43	2,92	48	29	23	1,42	17	34	2
No. 34	7,09	1,69	10,24	0,81	16,12	4,60	1,5	13,8	90	8,2	3,51	5,66	25,53	21,53	2,02	42	31	27	2,17	17	28	2
No. 35	7,11	24,98	37,04	0,94	20,53	4,57	2,2	11,9	116	11,4	4,49	4,85	26,63	26,04	2,65	40	35	25	1,49	19	20	1
No. 36	7,33	51,27	77,56	1,14	21,76	4,34	3,8	13,2	130	8,5	5,01	3,82	22,98	27,24	2,98	39	33	28	2,24	20	33	2
No. 37	7,38	2,53	40,63	2,18	13,19	4,14	2,2	11,8	94	2,6	3,19	1,90	7,94	19,51	2,06	53	27	20	3,82	22	31	2
No. 38	6,82	1,52	32,93	1,09	15,21	8,97	3,9	8,4	63	19,0	1,70	8,21	22,13	25,27	2,68	36	33	31	1,82	19	31	2
No. 39	7,02	46,39	49,16	1,02	16,44	4,17	4,7	12,8	135	5,5	3,94	4,10	20,26	21,64	2,53	39	35	26	2,15	20	37	2
No. 40	7,61	2,83	32,84	0,91	17,44	5,87	1,9	9,9	31	4,0	2,97	6,48	25,72	24,21	2,37	35	31	34	3,22	28	36	2
No. 41	6,29	68,30	11,53	0,55	16,58	2,02	8,9	8,8	476	15,2	8,22	3,68	33,90	19,14	13,71	40	47	13	1,31	18	45	5
No. 42	6,24	27,77	9,22	0,49	16,87	1,97	5,0	8,1	304	9,2	8,56	4,03	38,50	19,33	12,75	40	43	17	1,24	18	44	5
No. 43	6,36	77,46	12,37	1,12	31,88	2,65	9,3	6,0	322	15,7	12,05	2,37	30,86	35,64	13,15	38	43	19	1,15	20	42	5
No. 44	6,42	120,45	22,68	1,20	10,58	3,10	4,1	17,7	336	5,5	3,41	2,59	11,43	14,88	4,06	33	37	30	0,69	25	30	2
No. 45	6,72	115,23	98,81	2,61	10,38	3,05	7,5	13,9	255	8,1	3,41	1,17	5,15	16,04	3,40	39	35	26	2,04	25	26	2
No. 46	6,81	101,28	40,69	1,72	9,69	3,26	3,5	13,4	207	5,0	2,97	1,89	7,53	14,67	2,89	39	33	28	1,46	20	29	2
No. 47	6,95	17,42	41,63	1,26	12,05	4,18	3,3	13,1	137	8,1	2,88	3,32	12,91	17,49	2,93	42	33	25	3,66	29	30	2
No. 48	6,62	29,17	51,23	0,87	12,66	3,36	3,9	14,3	211	8,8	3,77	3,87	18,48	16,88	2,94	36	39	25	2,62	25	35	2

No. 49	6,97	40,48	71,13	1,05	14,92	3,22	4,7	13,5	170	9,7	4,64	3,07	17,32	19,18	2,98	38	39	23	2,91	26	33	2
No. 50	7,15	6,57	24,97	0,86	13,09	4,09	2,3	12,8	111	6,3	3,20	4,77	20,03	18,03	2,00	42	33	25	1,75	23	34	2
No. 51	6,91	11,07	34,21	0,91	14,92	4,43	3,5	13,3	165	15,1	3,37	4,86	21,21	20,25	3,68	36	37	27	2,42	17	37	2
No. 52	6,98	10,39	63,45	1,02	12,58	3,97	5,6	13,7	143	11,3	3,17	3,88	16,18	17,57	2,41	38	37	25	2,37	16	36	2
No. 53	6,72	46,40	43,46	0,88	15,41	3,90	4,6	14,0	186	10,2	3,95	4,43	21,95	20,19	3,44	36	39	25	2,20	19	36	2
No. 54	7,27	3,07	87,45	1,48	17,37	5,78	5,3	9,1	72	3,3	3,01	3,89	15,59	24,64	2,94	37	35	28	2,71	23	36	2
No. 55	6,14	41,89	19,49	0,61	20,44	3,14	6,1	7,5	359	19,2	6,52	5,16	38,77	24,18	14,58	40	47	13	0,75	16	34	4
No. 56	6,34	45,59	19,75	1,19	20,49	3,64	4,0	15,6	362	13,9	5,63	3,06	20,29	25,32	5,31	38	37	25	1,42	21	33	2
No. 57	6,65	69,05	34,50	1,60	8,99	2,67	4,2	17,5	278	7,6	3,37	1,66	7,27	13,26	2,74	35	33	32	2,26	25	27	2
No. 58	6,66	87,76	34,23	1,20	10,23	2,84	4,3	14,1	254	5,5	3,60	2,37	10,90	14,27	3,35	39	37	24	1,22	23	24	2
No. 59	6,92	120,35	68,92	1,38	12,51	3,25	4,6	13,8	193	4,8	3,85	2,35	11,41	17,13	3,46	37	37	26	1,13	25	28	2
No. 60	6,80	8,54	23,73	1,38	16,31	4,56	2,0	14,5	127	11,6	3,58	3,29	15,08	22,25	2,33	42	35	23	2,48	17	31	2
No. 61	6,85	52,42	73,86	1,17	16,75	3,66	4,7	15,9	168	9,9	4,58	3,12	17,38	21,59	2,52	42	29	29	2,00	24	38	2
No. 62	6,95	13,53	14,21	0,84	16,84	3,91	2,6	16,7	180	4,0	4,30	4,69	24,86	21,59	3,01	35	35	30	2,80	15	40	5
No. 63	6,72	86,39	27,99	0,77	19,42	3,68	3,1	13,4	159	8,4	5,28	4,78	30,06	23,87	2,71	46	27	27	2,95	26	32	2
No. 64	6,69	7,04	11,94	1,09	12,79	4,70	3,5	20,1	137	9,1	2,72	4,32	16,06	18,58	2,45	48	27	25	2,89	22	33	2
No. 65	7,10	9,92	108,49	2,17	18,31	5,13	6,6	12,4	145	8,7	3,57	2,36	10,80	25,60	2,72	41	29	30	2,40	20	29	2
No. 66	7,06	2,73	19,45	1,15	16,31	5,08	4,6	13,5	89	9,3	3,21	4,40	18,55	22,54	2,39	39	27	34	2,95	21	28	2
No. 67	6,30	182,73	10,23	0,50	14,47	2,35	7,5	10,7	448	4,7	6,16	4,68	33,46	17,32	12,78	33	45	22	1,29	17	33	4
No. 68	6,12	168,02	24,27	1,12	9,18	2,40	4,5	15,4	458	7,1	3,82	2,15	10,35	12,70	5,80	31	41	28	1,44	21	25	2
No. 69	6,45	149,95	24,24	1,08	11,08	3,42	4,0	14,8	391	5,7	3,24	3,16	13,41	15,58	4,45	37	37	26	1,22	23	25	2
No. 70	6,92	139,64	66,28	1,66	12,38	3,19	6,4	13,7	265	5,9	3,89	1,91	9,35	17,23	3,66	35	37	28	2,46	21	25	2
No. 71	7,01	112,14	32,92	2,24	8,42	3,83	3,5	12,5	124	3,3	2,20	1,71	5,47	14,48	1,87	53	27	20	1,17	21	29	2
No. 72	6,67	38,87	14,13	0,77	11,58	3,52	2,4	15,5	184	7,0	3,29	4,58	19,68	15,87	1,93	44	27	29	3,04	26	36	2
No. 73	6,89	29,25	9,40	1,30	12,86	3,90	2,9	14,5	160	12,4	3,30	3,00	12,89	18,06	2,69	40	29	31	4,84	19	38	5
No. 74	6,77	22,96	13,72	1,08	15,70	4,12	2,5	16,7	198	9,0	3,81	3,82	18,39	20,90	3,02	34	35	31	2,75	18	38	2
No. 75	6,90	46,50	13,66	0,78	17,30	4,86	2,9	15,3	117	5,3	3,56	6,24	28,47	22,94	1,71	34	37	29	3,46	28	25	2

No. 76	6,77	19,29	26,87	0,87	17,14	6,82	2,7	12,6	61	13,7	2,51	7,85	27,58	24,83	2,39	34	29	37	2,62	26	31	2
No. 77	6,95	37,63	14,41	1,05	14,46	4,21	4,0	17,3	149	5,1	3,44	4,01	17,77	19,72	2,64	32	31	37	2,38	26	36	2
No. 78	7,00	3,77	22,33	0,79	12,92	4,94	2,3	14,6	99	14,5	2,62	6,25	22,59	18,65	2,28	41	31	28	2,13	20	30	2
No. 79	6,12	196,69	17,39	0,75	11,97	2,30	8,7	10,5	510	5,3	5,21	3,08	19,09	15,02	12,02	37	41	22	0,73	19	28	2
No. 80	6,58	199,26	19,69	1,53	14,14	3,25	4,7	10,4	411	4,3	4,35	2,13	11,40	18,91	8,83	37	41	22	1,29	17	27	2
No. 81	6,19	111,15	11,95	19,14	4,10	4,20	4,2	17,9	351	8,0	4,67	8,46	47,97	23,72	5,34	32	31	37	1,73	19	41	2
No. 82	6,87	28,32	44,42	1,85	23,09	3,78	5,7	14,0	170	13,7	6,11	2,04	14,53	28,72	3,45	38	31	31	2,46	15	25	2
No. 83	6,82	138,06	20,90	14,33	3,33	2,90	2,9	13,9	151	5,3	4,30	3,73	19,77	18,56	2,49	40	35	25	2,02	21	40	2
No. 84	6,72	106,81	22,40	17,99	3,63	4,40	4,4	15,6	194	4,8	4,96	3,73	22,26	22,59	2,84	34	39	27	1,29	15	22	2
No. 85	6,50	31,67	31,42	9,86	2,69	3,20	3,2	15,1	218	6,5	3,66	3,49	16,27	13,32	1,90	48	29	23	1,67	20	25	2
No. 86	6,74	25,58	12,71	12,25	4,18	3,40	3,4	16,5	156	7,4	2,93	4,55	17,87	17,35	2,76	38	29	33	4,35	23	20	2
No. 87	6,99	101,19	18,06	17,06	4,58	2,70	2,7	13,0	169	7,1	3,73	4,54	21,49	22,65	3,70	42	33	25	2,28	25	26	2
No. 88	6,54	35,04	10,91	10,61	3,13	2,60	2,6	18,5	190	10,2	3,39	4,34	19,07	14,46	2,78	34	33	33	3,00	18	34	5
No. 89	6,83	24,07	14,55	0,58	17,26	5,34	2,5	12,0	132	13,6	3,23	9,22	39,01	23,18	2,91	39	33	28	1,97	25	33	2
No. 90	6,52	47,67	6,93	16,97	3,36	5,30	5,3	8,2	206	7,3	5,05	4,88	29,54	21,01	9,22	42	43	15	0,46	11	45	4
No. 91	6,53	78,93	12,65	18,61	5,13	4,50	4,5	19,8	235	10,5	3,62	8,25	38,15	24,36	3,36	32	29	39	1,86	21	37	2
No. 92	6,58	44,33	14,26	11,59	3,62	3,80	3,8	20,9	234	12,0	3,21	3,73	15,71	16,18	2,56	32	31	37	1,89	17	37	2
No. 93	6,79	15,89	14,75	13,28	3,73	3,30	3,3	16,3	165	4,8	3,56	3,91	17,83	17,97	2,16	40	31	29	1,88	18	41	2
No. 94	6,79	63,59	29,05	12,69	3,31	3,50	3,5	17,8	170	5,2	3,83	2,69	13,02	17,23	2,31	42	29	29	2,68	20	24	2
No. 95	6,55	6,30	8,47	0,75	12,84	5,23	2,7	14,7	143	23,6	2,46	6,99	24,14	18,82	2,40	35	27	38	4,81	21	36	5
No. 96	6,80	6,87	4,37	0,45	16,27	7,40	0,8	6,1	49	6,3	2,20	16,58	53,02	24,12	1,81	41	33	26	3,48	20	34	5
No. 97	6,71	2,18	33,15	0,75	17,64	5,67	3,8	15,0	192	32,8	3,11	7,56	31,10	24,05	2,87	32	29	39	3,24	26	31	2

Anexo 4. Fotografías.

Ubicación de la unidad de análisis



Instalación del penetrómetro dinámico



Instalación de la sonda digital



Toma de muestras y submuestras



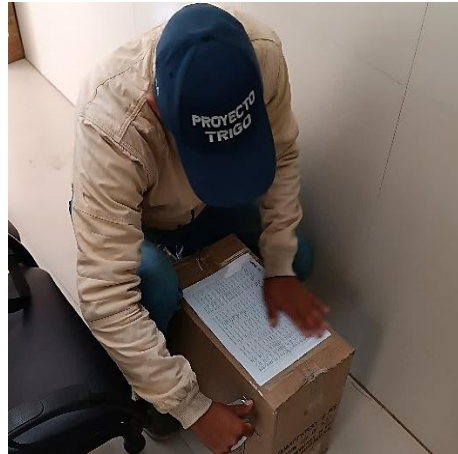
Homogenizado de las muestras y submuestras



Peso y etiquetado de las muestras tomadas



Empaquetado y traslado de las muestras



Visita de campo



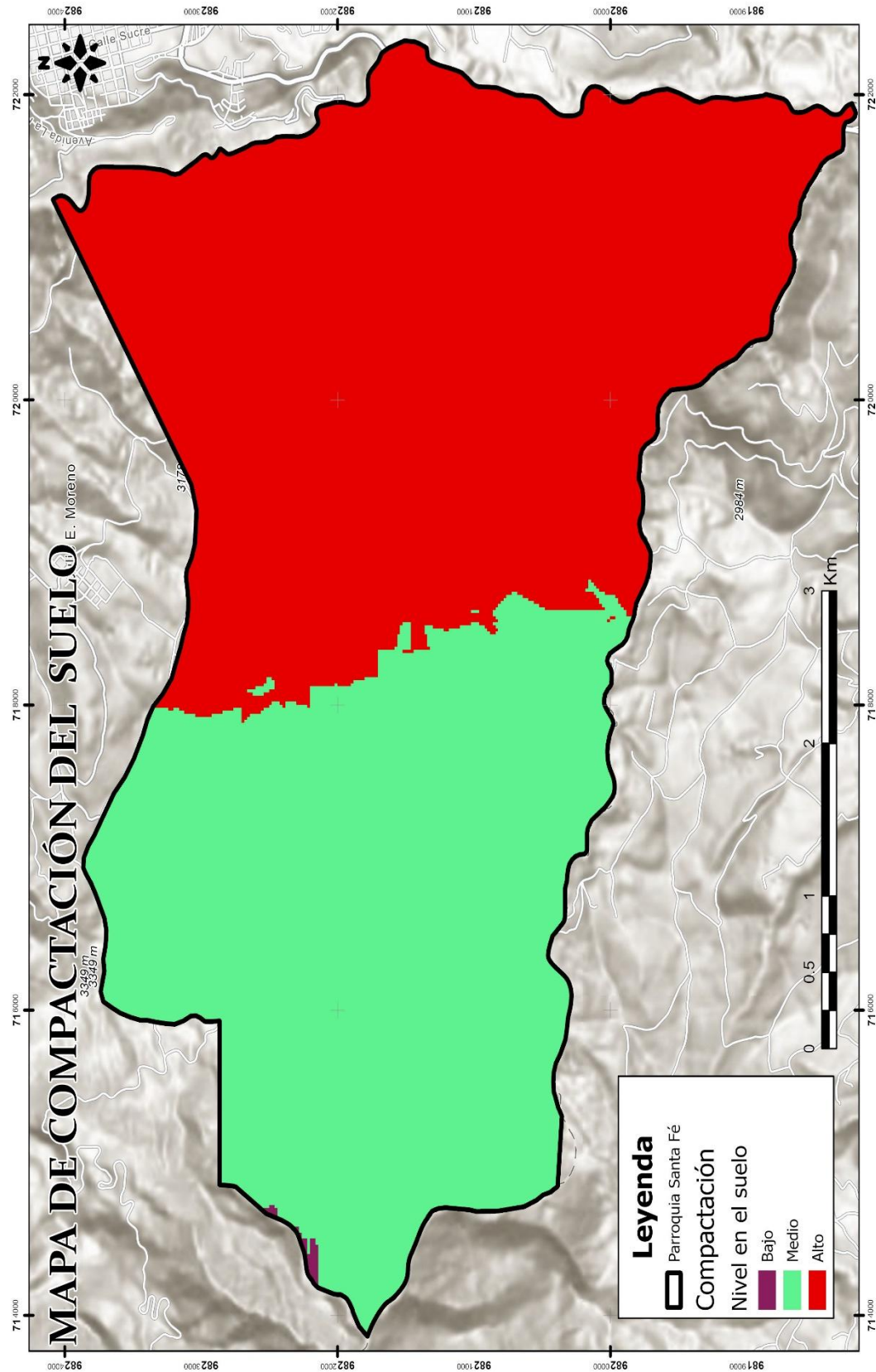
Anexo 5. Categorías establecidas para cada parámetro físico-químico.

PARÁMETRO	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
pH	< 5	5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 9	> 9
Comp (MPa)		< 1	1 - 2	> 2	
MO (%)	< 1.5	1.6 - 3	3.1 - 4.5	4.6 - 6	> 6
N (ppm)	<10	11 - 15	16 - 25	>25	
P (ppm)	< 8	9 - 15	16 - 20	21 a 30	> 31
K (meq/100g)	< 0.307	0.308 - 0.409	0.41 - 0.51	0.52 - 0.61	> 0.61
Ca (meq/100g)	<1.24	1.25 - 2.49	2.5 - 12.47	12.48 - 24.95	> 24.95
Mg (meq/100g)		< 0.41	0.42 - 1.23	> 1.23	
Zn (ppm)	< 0.25	0.26 - 0.50	0.51 - 0.75	0.76 - 1	> 1
Fe (ppm)	< 1	1.1 - 2	2.1 - 4.5	4.6 - 10	>10
Mn (ppm)	< 0.5	0.6 - 1	1.1 - 2	2.1 - 4	> 4
Cu (ppm)	< 0.1	0.11 - 0.2	0.21 - 0.3	0.31 - 0.6	> 0.6
Boro (ppm)	< 0.1	0.11 - 0.25	0.26 - 0.5	0.51 - 1.4	>1.4
Relación Ca/Mg	<1	1 - 2	2 - 5	>5	
Relación Mg/K	<1	1 - 3	3	3 - 18	>18
Relación (Ca + Mg) /K		<40		>40	

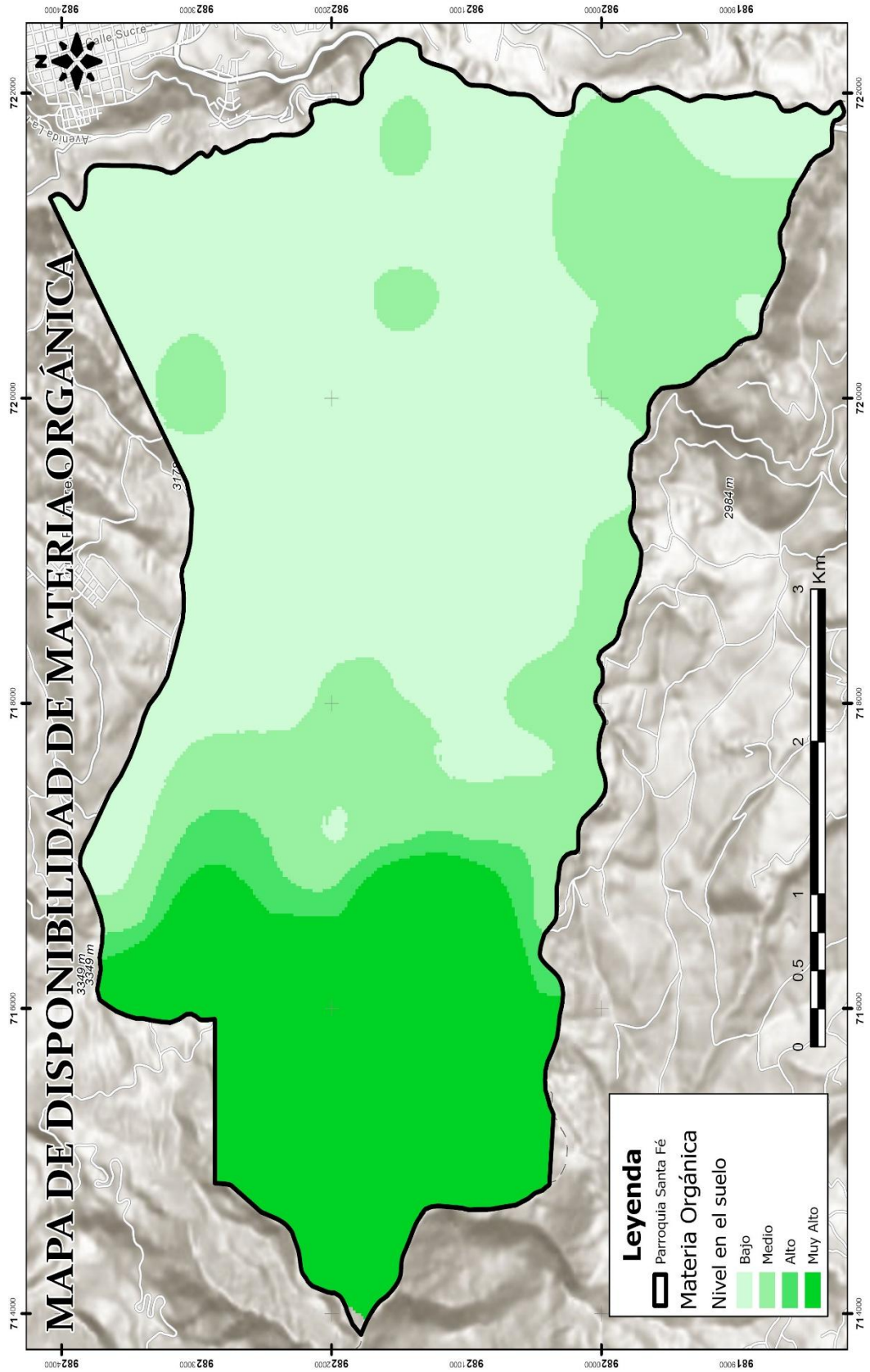
Fuente: Laboratorio de suelo de la Estación Experimental Santa Catalina.

Anexo 6. Mapas de las características físico-químicas del suelo.

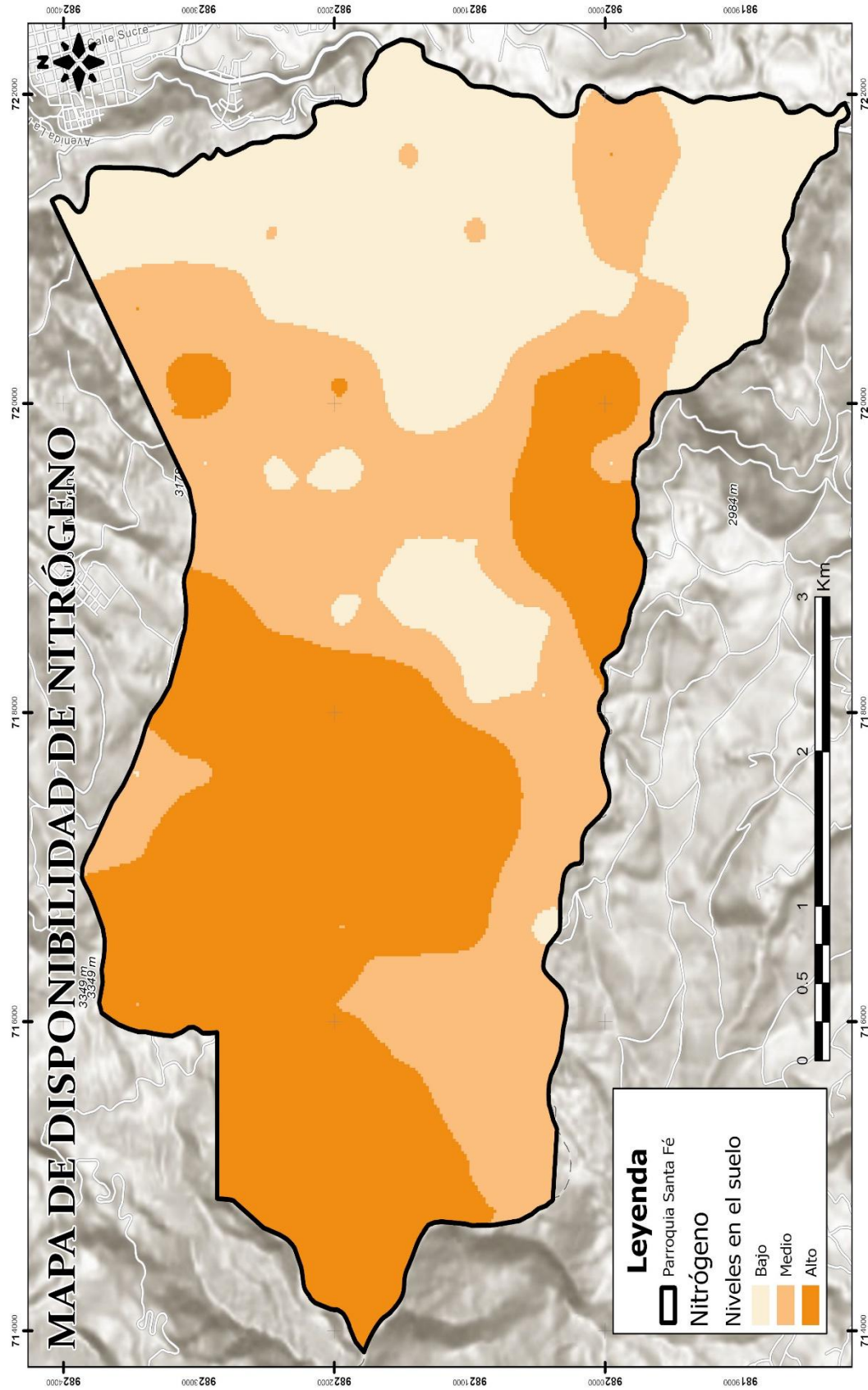
Anexo 6.1 Mapa de compactación del suelo.



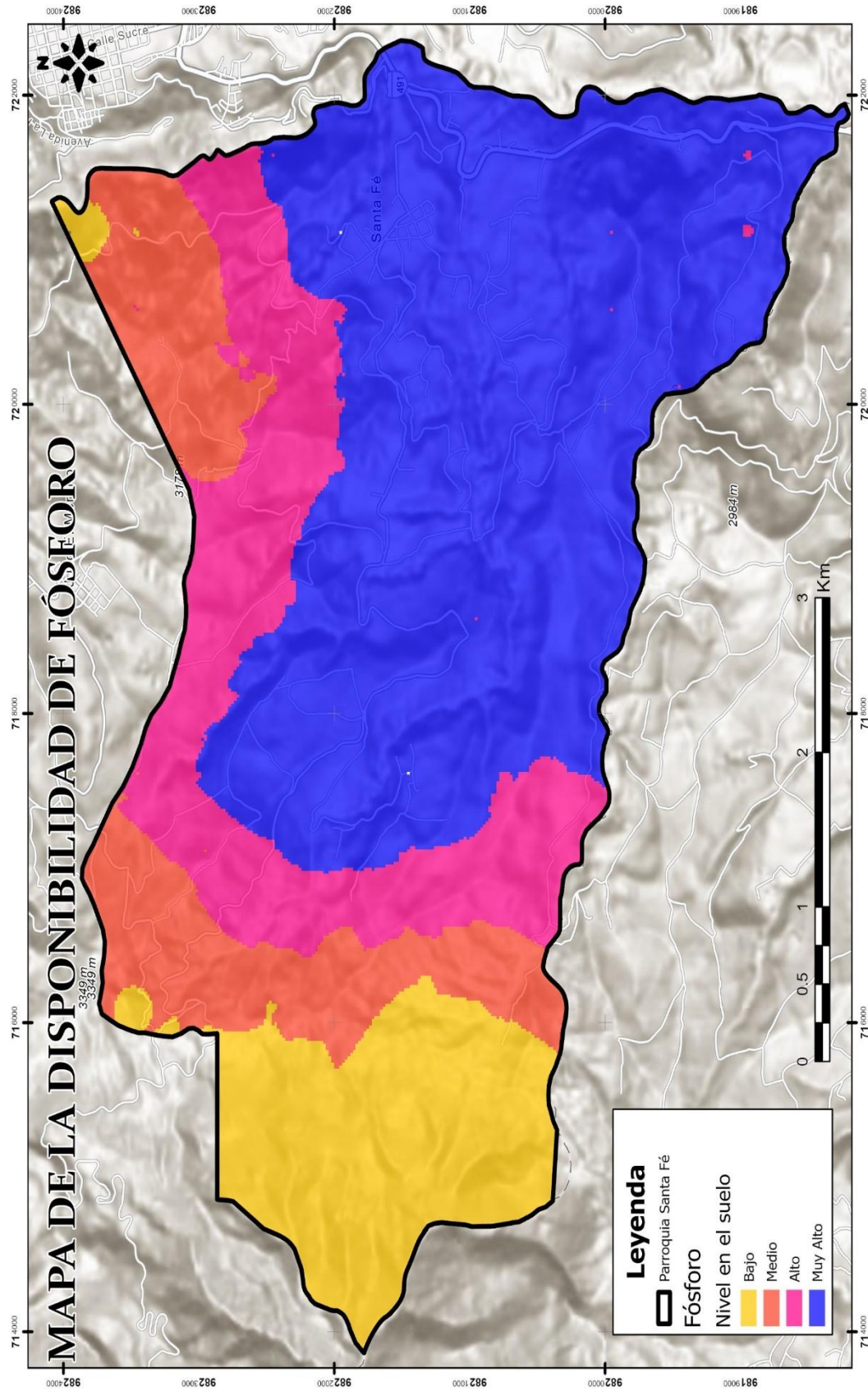
Anexo 6.2. Mapa de disponibilidad de materia orgánica.



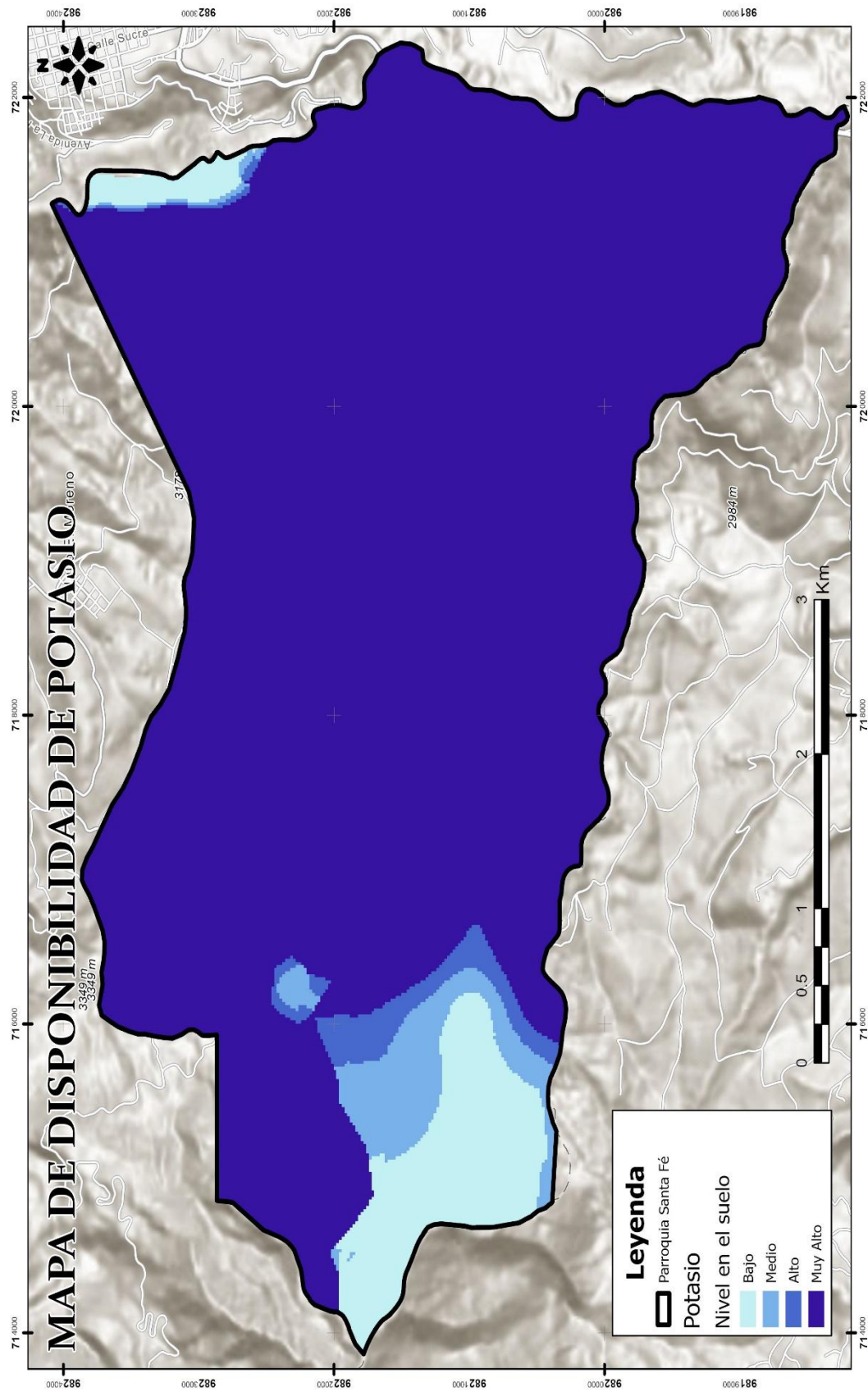
Anexo 6.4. Mapa de disponibilidad de Nitrógeno.



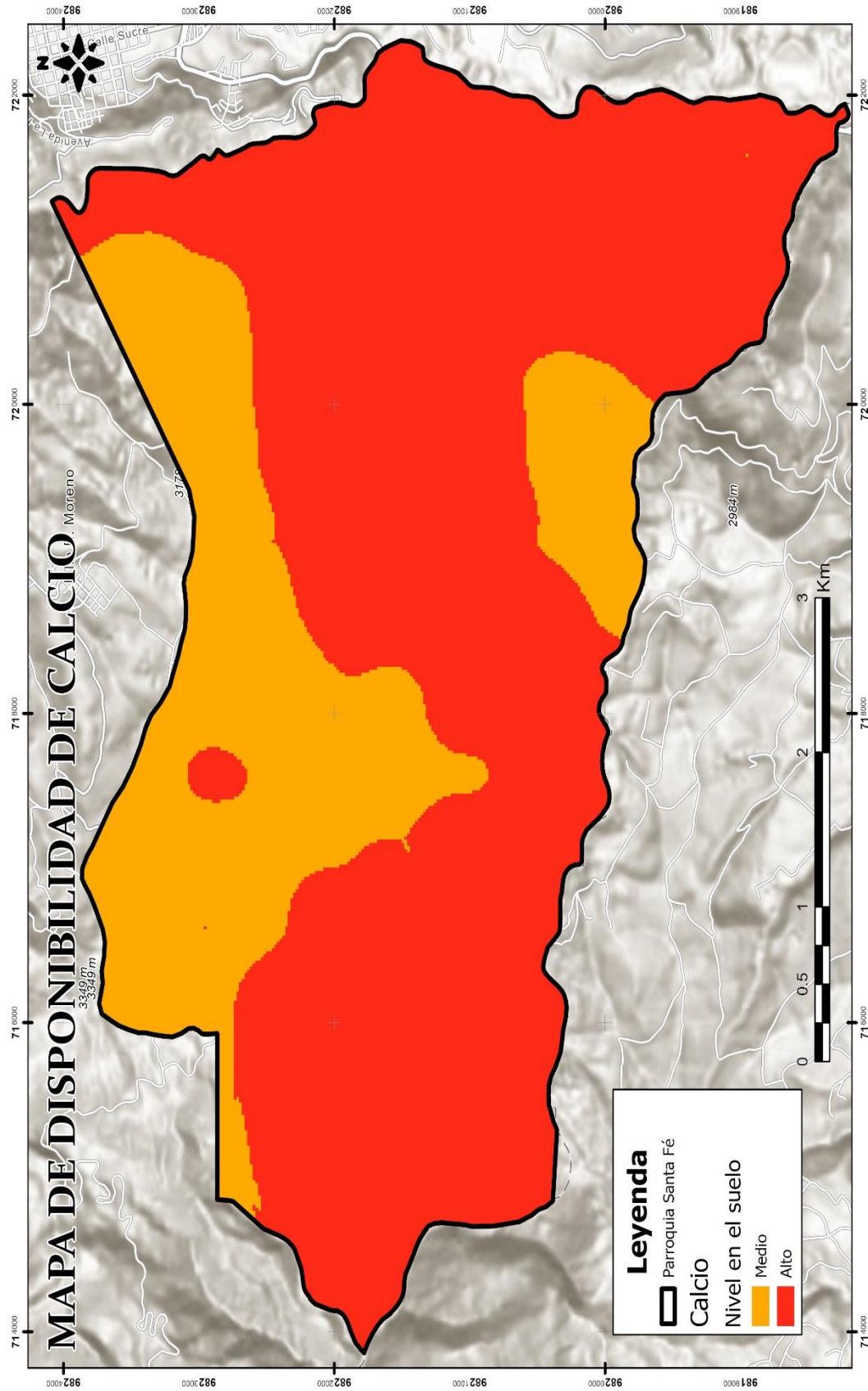
Anexo 6.5. Mapa de la disponibilidad del Fósforo.



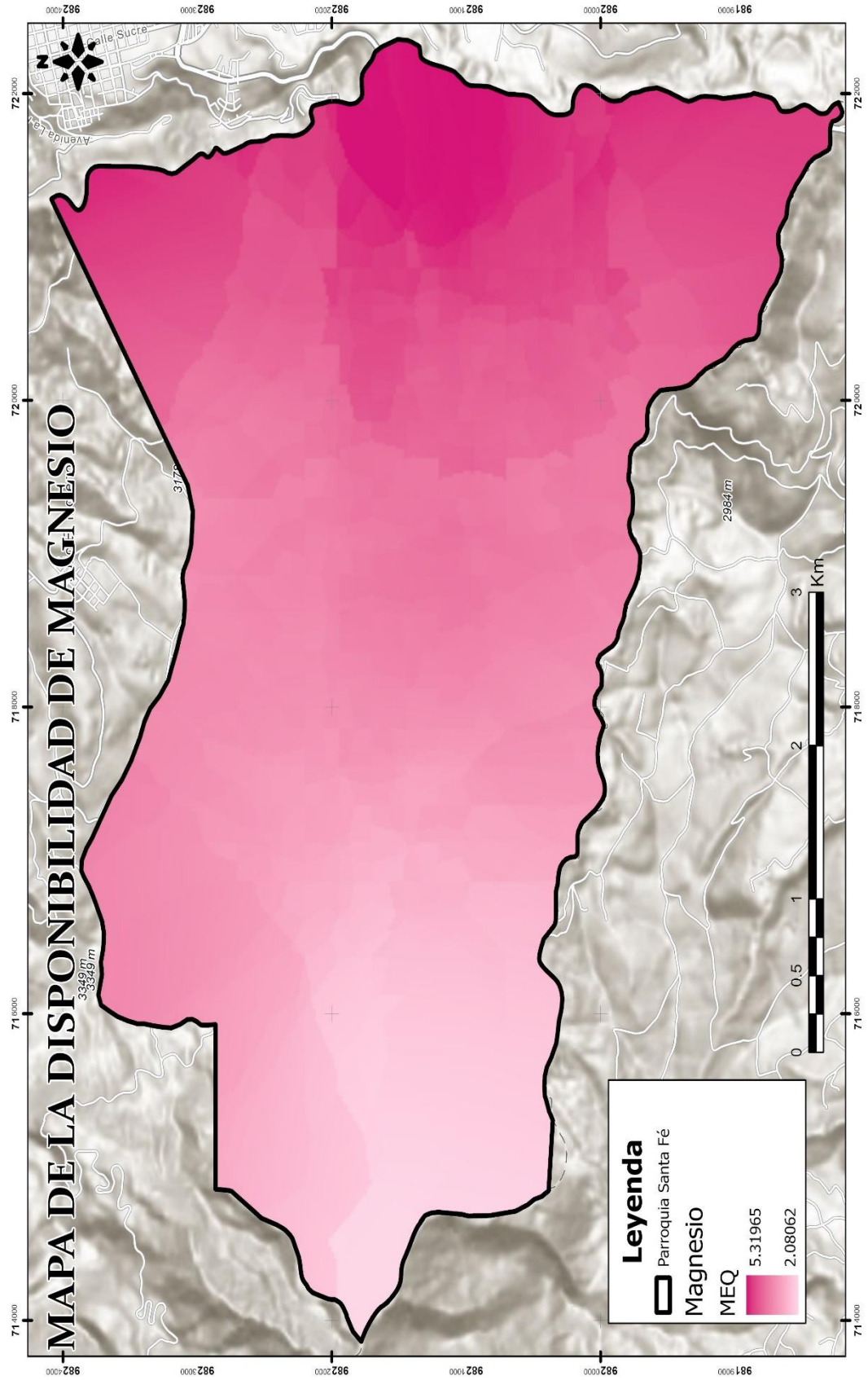
Anexo 6.6. Mapa de la disponibilidad del Potasio.



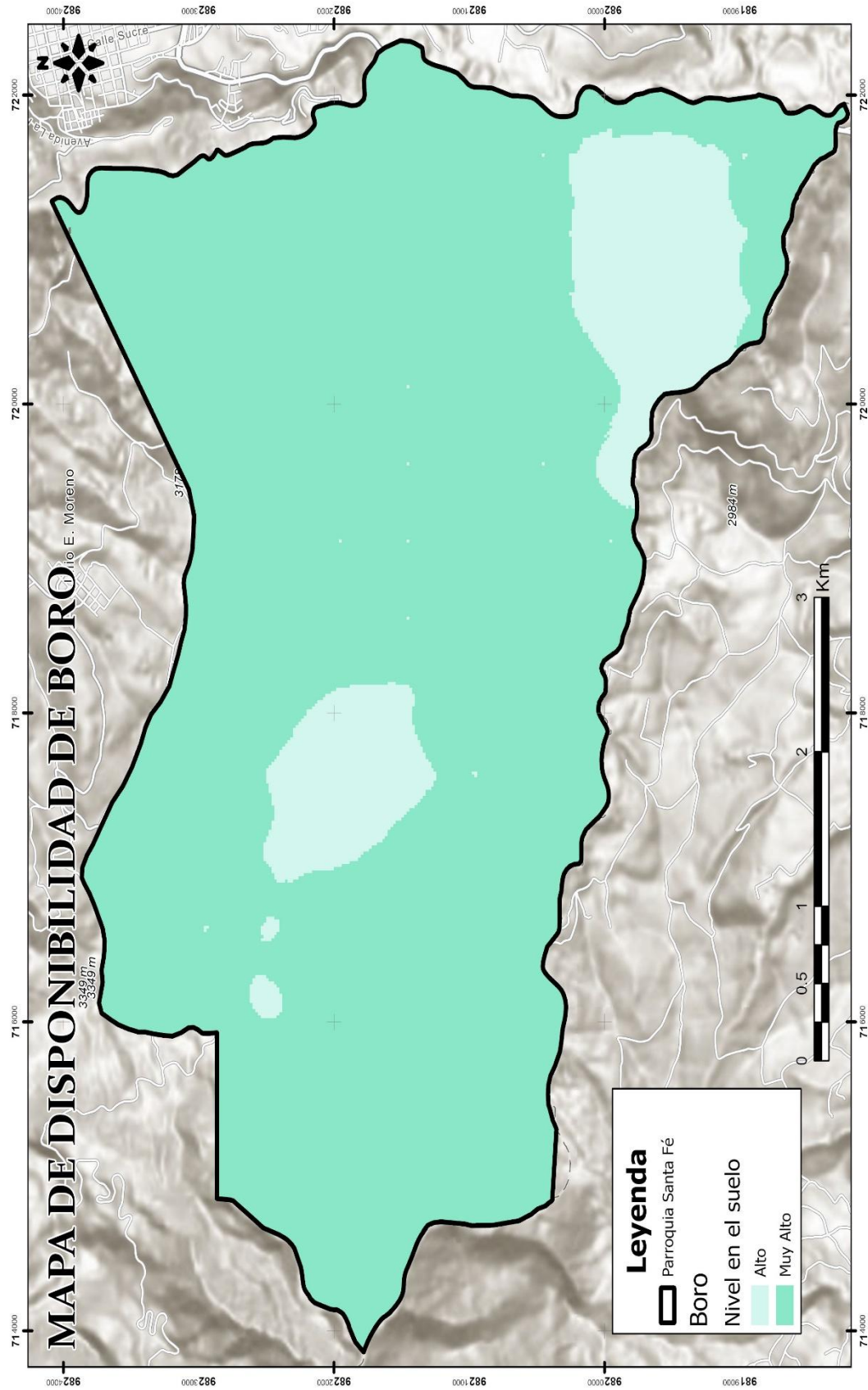
Anexo 6.7. Mapa de la disponibilidad del Calcio.



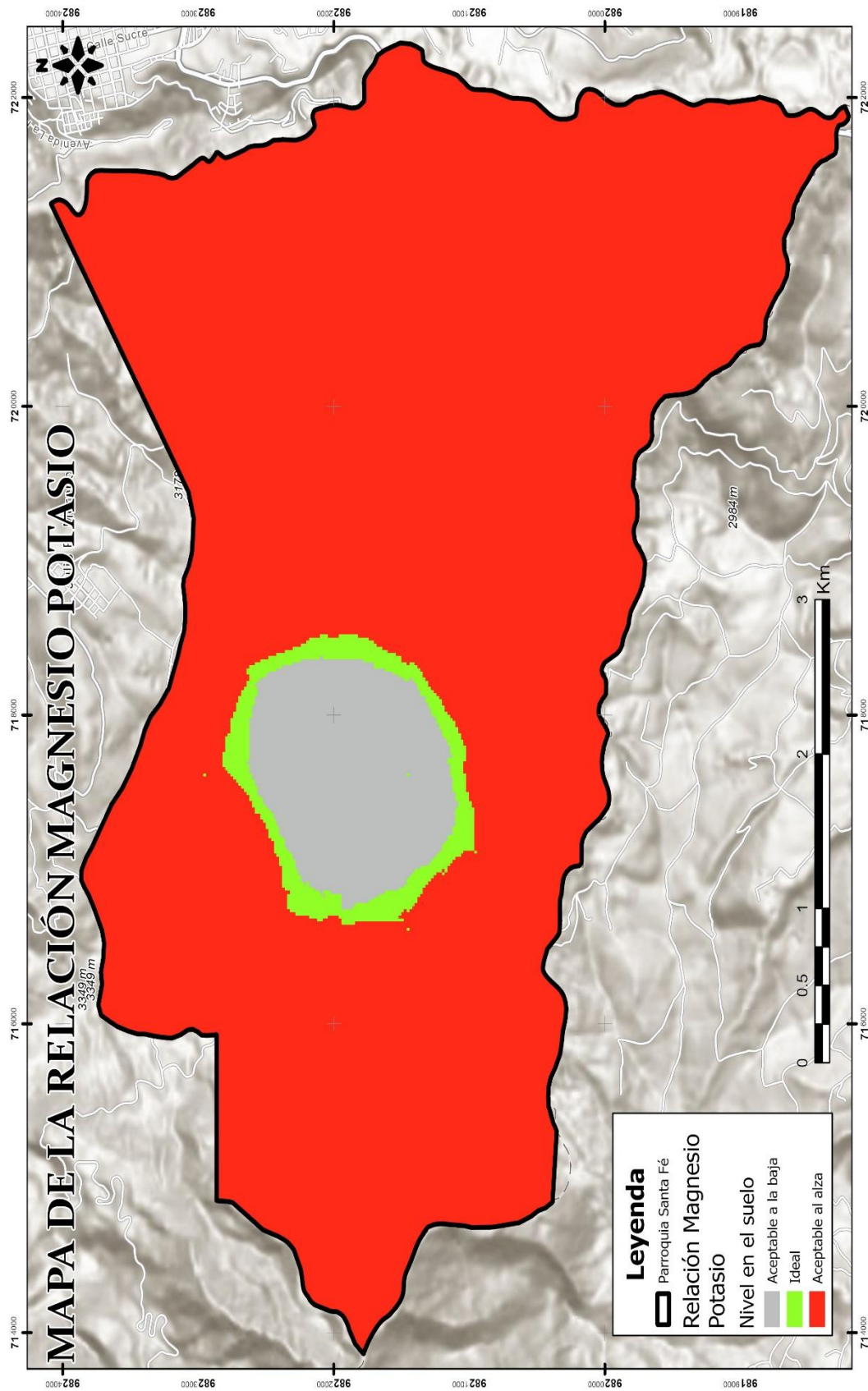
Anexo 6.8. Mapa de la disponibilidad del Magnesio.



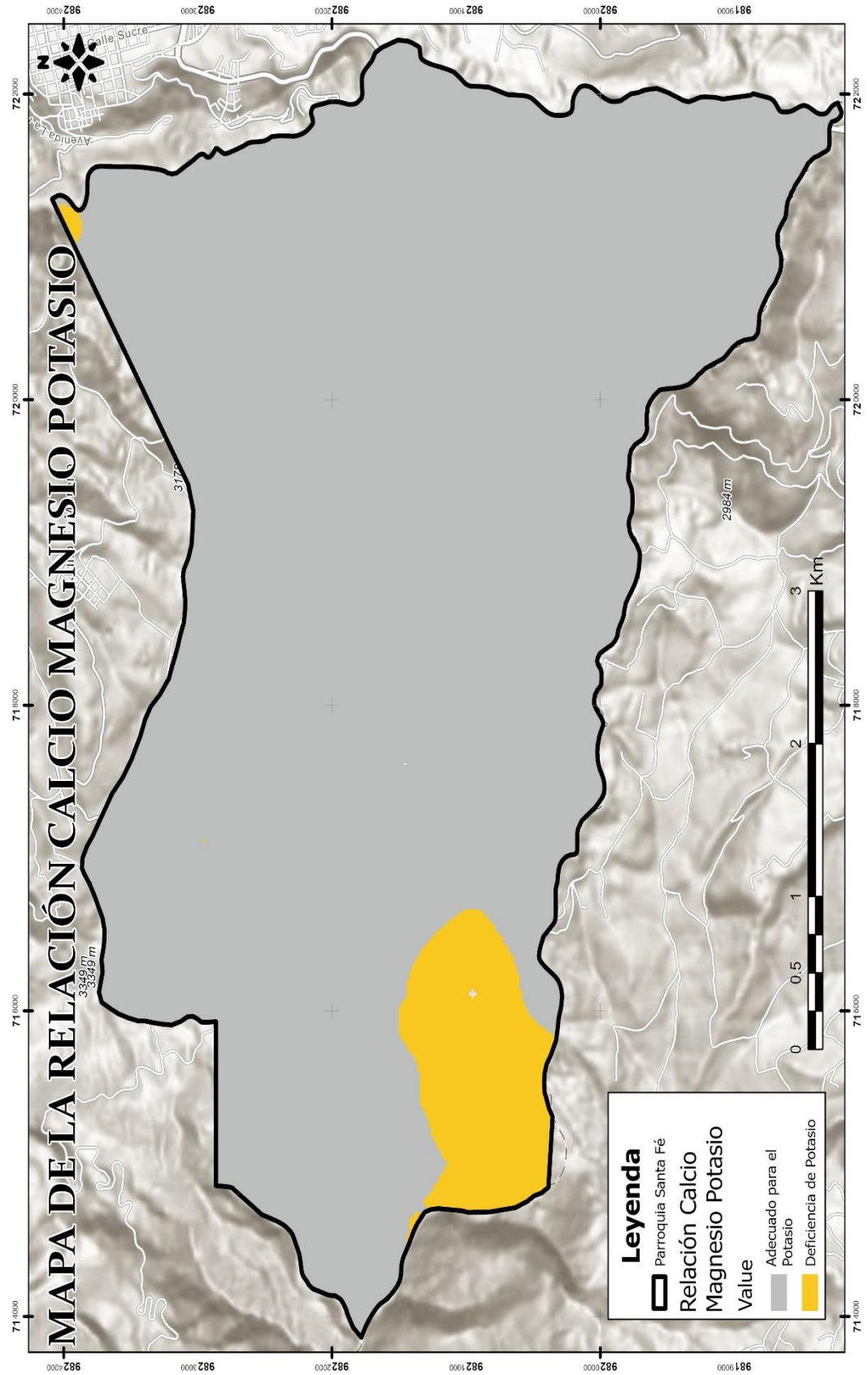
Anexo 6.9. Mapa de la disponibilidad del Boro.



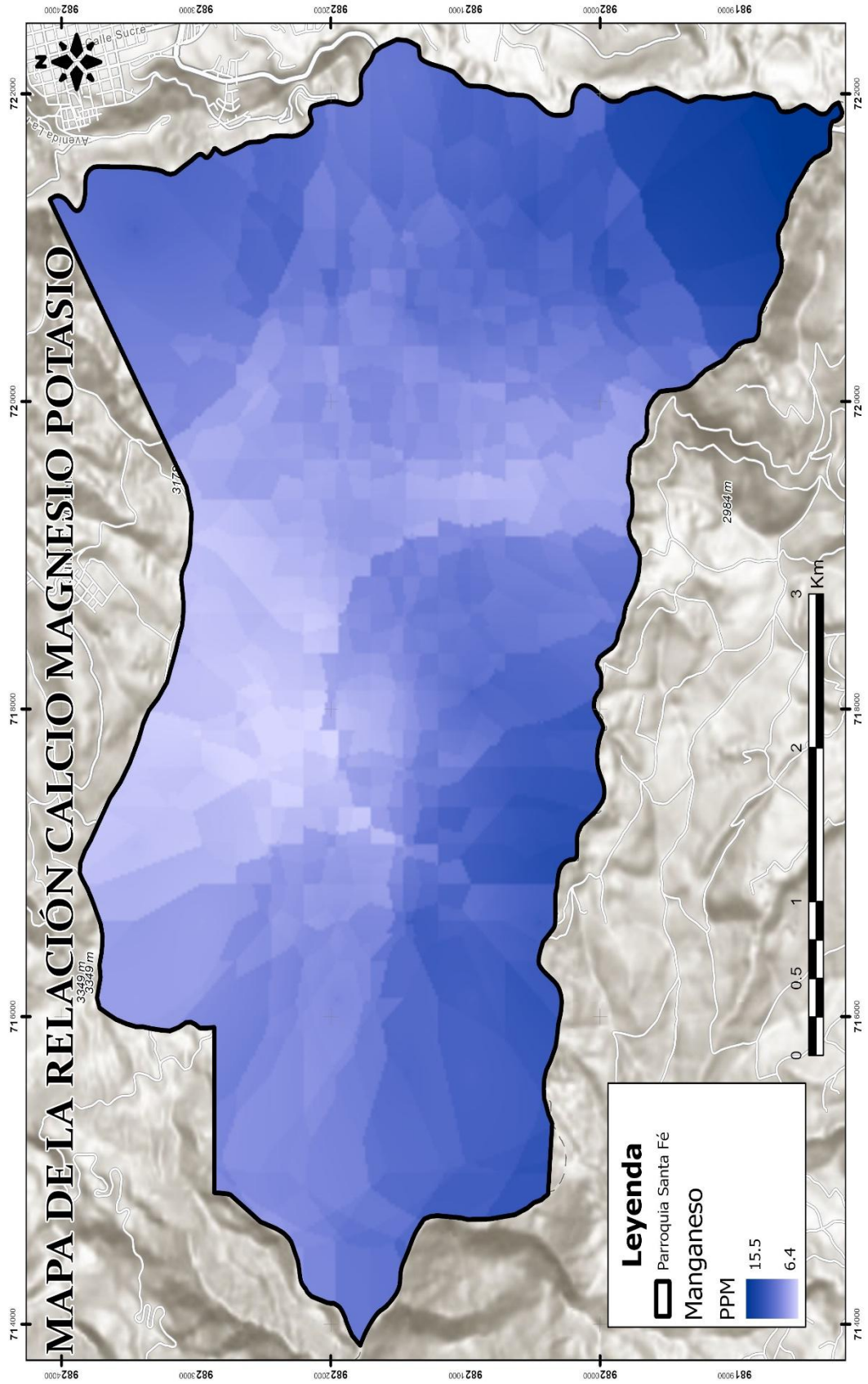
Anexo 6.11. Mapa de la relación Magnesio Potasio.



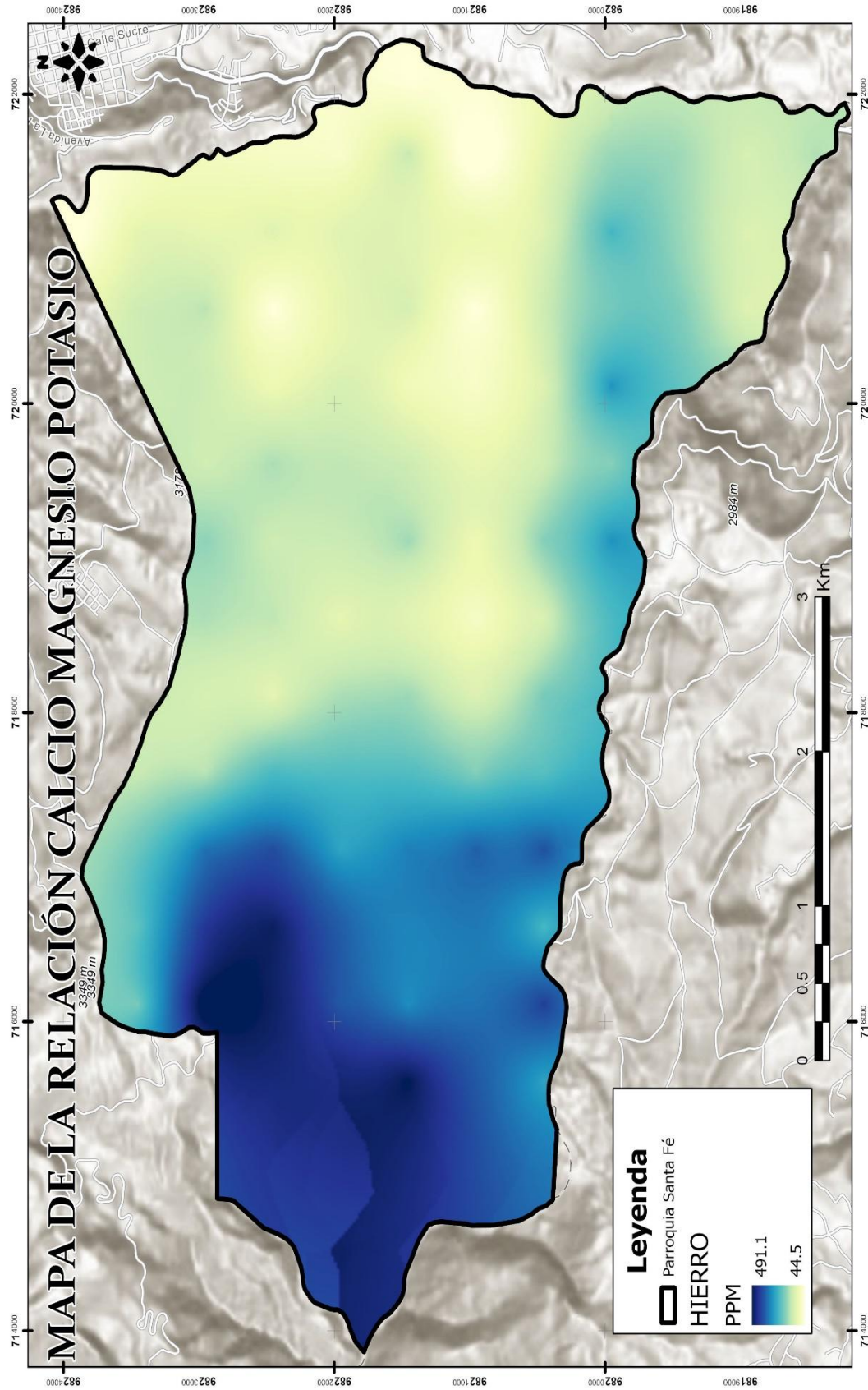
Anexo 6.12. Mapa de la relación Calcio Magnesio Potasio.



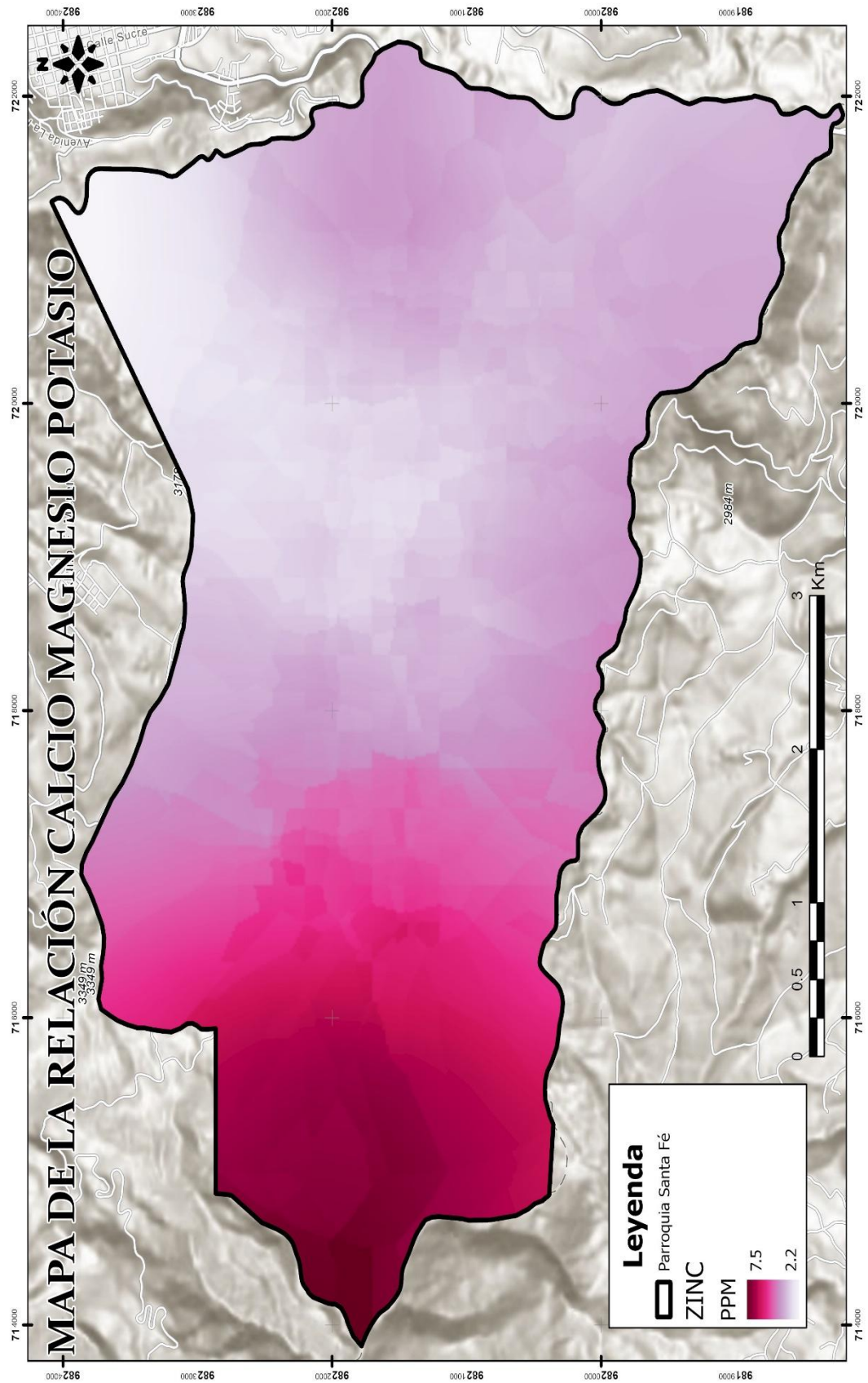
Anexo 6.13. Mapa de la disponibilidad de Manganeso.



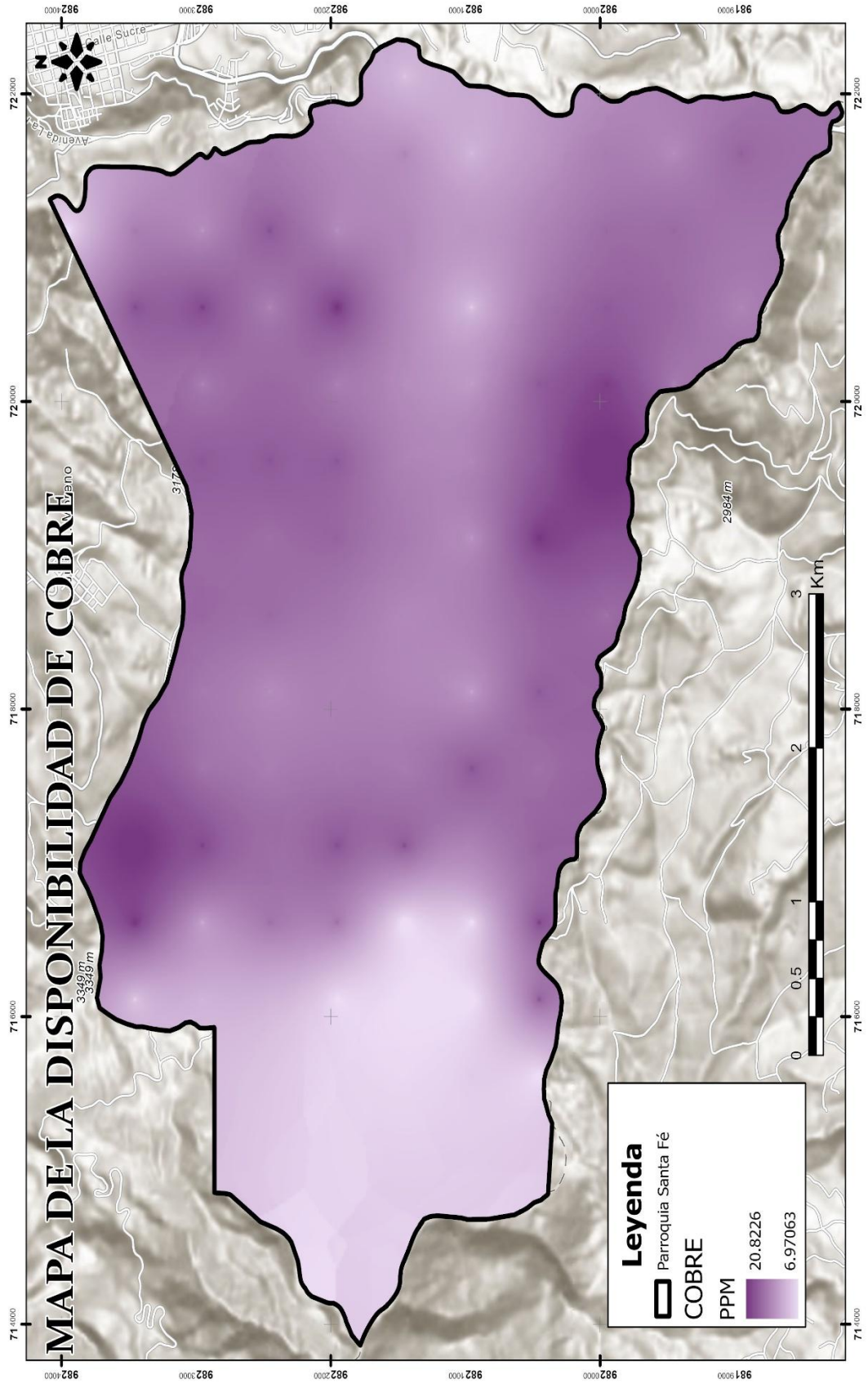
Anexo 6.14. Mapa de la disponibilidad de Hierro.



Anexo 6.15. Mapa de la disponibilidad de Zinc.



Anexo 6.16. Mapa de la disponibilidad de Cobre.



Anexo 7. Glosario de términos técnicos.

Adsorción: Es el proceso mediante el cual ciertas sustancias, como nutrientes, agua o pesticidas, se adhieren a la superficie de partículas del suelo, especialmente a las de arcilla y materia orgánica. Este fenómeno físico-químico influye directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la retención de agua, la eficacia de fertilizantes y plaguicidas, y la capacidad del suelo para filtrar contaminantes. Por ello, la adsorción desempeña un papel fundamental en la fertilidad del suelo y en el manejo sostenible de los recursos agrícolas.

Aireación: Es proporcionar un suministro de aire al subsuelo moviendo el O₂ y el CO₂ entre los poros de la tierra y la atmósfera, de tal manera que mejora la oxigenación y permite que las raíces de las plantas respiren mejor.

Catión: Es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, que resulta de la pérdida de uno o más electrones. Los cationes se describen como el estado de oxidación positiva y son fundamentales en las interacciones químicas del suelo.

Cobertura vegetal: Definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisiológicas y ambientales.

Coloide: es una partícula extremadamente pequeña, generalmente de origen mineral (como arcillas) u orgánico (como humus), que tiene una gran superficie específica y una alta capacidad para retener agua, nutrientes e iones. Estas partículas no se sedimentan fácilmente y permanecen suspendidas en el agua del suelo. Los coloides del suelo son fundamentales para su fertilidad, ya que poseen carga eléctrica (generalmente negativa) que les permite atraer y retener cationes como calcio, magnesio, potasio y amonio, facilitando su disponibilidad para las plantas. Además, influyen en la estructura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH.

Degradación: Es el proceso mediante el cual, el suelo o los ecosistemas pierden calidad, fertilidad o capacidad de soporte de vida debido a la erosión, contaminación, uso excesivo o prácticas agrícolas insostenibles.

Diagrama textural: Es un triángulo equilátero que determina la textura del suelo, en función de la proporción de arena, limo y arcilla.

Erosión: Es el desgaste sea de naturaleza física o química, y transporte de la capa que sufre la superficie de la tierra por agentes como el viento, el agua o la actividad humana, lo que provoca la pérdida de suelo fértil.

Fertilidad: Es la capacidad que tiene el terreno para sustentar el crecimiento de las plantas y optimizar el rendimiento de los cultivos, puede potenciarse por medio de fertilizantes orgánicos e inorgánicos que nutran el suelo.

Granulometría: Es el estudio y clasificación de las partículas del suelo (arena, limo y arcilla), según su tamaño previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

Grilla de muestreo: Es un método utilizado para organizar la toma de muestras en un terreno dividiéndolo en una cuadrícula regular, que permite obtener datos representativos, facilitando el análisis espacial y la toma de decisiones.

Iones: Son átomos o moléculas que han perdido o ganado electrones, obteniendo una carga eléctrica positiva (cationes) o negativa (aniones), son esenciales para la nutrición de las plantas y la química del suelo.

Materia orgánica: Es todo aquel material de origen biológico presente en el suelo, compuesto por residuos de plantas y animales en diferentes etapas de descomposición, razón por la cual se conoce a la química orgánica como la “química del carbono”, está vinculada con la fertilidad del suelo, ya que mejora su estructura y capacidad de retención de nutrientes.

Meteorización: Es el proceso de descomposición y alteración de las rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre, debido a la acción del clima (agua, viento, temperatura) y los organismos vivos. Puede ser física (desintegración) o química (transformación de minerales).

MPa: Se refiere a megapascales, una unidad de presión o tensión utilizada para medir la resistencia del suelo o la tensión del agua en el suelo. Esta unidad es común en estudios de física de suelos, especialmente cuando se mide la resistencia a la penetración y la disponibilidad de agua para las plantas. En otras palabras, nos indica qué tan fuerte es el suelo y cuánta fuerza se necesita para penetrarlo o deformarlo.

Permeabilidad: Es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire y es una de las cualidades más importantes.

Porosidad del suelo: El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso.

PPM: Se refiere a partes por millón, es una unidad de medida que se utiliza para expresar concentraciones muy pequeñas de una sustancia en otra, en este caso, de un elemento o compuesto en el suelo, ya que nos permite conocer la composición química del suelo y tomar decisiones informadas sobre su manejo y uso.

Pedogénicos: Son aquellos que ocurren en el suelo y dan lugar a su formación y evolución, es decir, son los cambios que experimenta el material parental (roca madre) a lo largo del tiempo, cada proceso pedogénico contribuye a la diversidad de suelos en distintas regiones y climas, dando lugar a suelos con propiedades específicas (químicas, físicas y biológicas) y adecuadas para ciertos usos agrícolas.

Supeditado: Es una condición de dependencia de un factor respecto a otro dentro del sistema agrícola, que implica ciertos procesos y resultados están condicionados por la ocurrencia, disponibilidad o cumplimiento de otros elementos previos.