

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMIA



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS
DEL FUNDO DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA EN TINGO MARÍA

TESIS

Para optar el título de
INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR
FERNANDO GEAAN PIEREE GARCIA PINEDO

Asesor
VICTORINO RIVAS PULACHE

Tingo María – Perú
2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE AGRONOMÍA



Km 1.21 carretera Tingo María. Telf. (062) 561136 E.mail: fagro@unas.edu.pe.

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Nº 008-2025-FA-UNAS

BACHILLER : FERNANDO GEAAN PIEREE GARCIA PINEDO

TÍTULO : DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNOS PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS DEL FUNDO DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA EN TINGO MARÍA

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
VOCAL : M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL : Dr. GILBERTO MEDINA DIAZ

ASESOR : Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 12/05/2025

HORA DE SUSTENTACIÓN : 08:30 A.M.

LUGAR DE SUSTENTACIÓN : Sala de Audiovisuales de la F.A.

CALIFICATIVO : BUENO

RESULTADO : APROBADO

OBSERVACIONES A LA TESIS : EN HOJA ADJUNTA

TINGO MARÍA, 12 DE MAYO DEL 2025

.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
PRESIDENTE

.....
M.Sc. JAIME JOSSEPH CHAVEZ MATIAS
VOCAL

.....
Dr. GILBERTO MEDINA DIAZ
VOCAL

.....
Dr. VICTORINO RIVAS PULACHE
ASESOR



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 279 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Agronomía

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL FUNDO DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA EN TINGO MARÍA	FERNANDO GEAAN PIEREE GARCIA PINEDO	04 % Cuatro	Menor a 20 %

Tingo María, 26 de agosto de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



Distribución espacial de algunos parámetros físicos y químicos del fundo de la Facultad de Agronomía en Tingo María

Autor	: Fernando Geaan Pieree Garcia Pinedo
Asesor	: Dr. Victorino Rivas Pulache
Área de investigación	: Agricultura moderna y tradicional
Línea de investigación	: Geomática y Agricultura de precisión
Eje temático de investigación	: Uso sistemas de información geográfica (SIG)
Lugar de ejecución	: Fungo Agrícola N° 1 de la UNAS (FUNAS-I) Tingo María.
Duración del trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: S/7,865.00

Tingo María – Perú. Mayo 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
VICERRECTOR DE INVESTIGACION
Instituto de Investigación
Unidad de Gestión de la Investigación

FORMATO PARA REGISTRAR LA TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
UNIVERSITARIO

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Facultad : Agronomía

Escuela profesional : Agronomía

Departamento académico : Ciencias agrarias

Título de Tesis : Distribución espacial de algunos parámetros físicos y químicos del fundo de la Facultad de Agronomía en Tingo María.

Objetivo general : Determinar la distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del suelo en el fundo de la Facultad de Agronomía en Tingo María.

Autor : Fernando Geaan Pieree Garcia Pinedo

DNI : 74313169

Correo electrónico : geaan.garcia@unas.edu.pe

Asesor de Tesis : Dr. Victorino Rivas Pulache

Área de investigación : Agricultura moderna y tradicional

Grupo de investigación : Geomática y agricultura sostenible en la amazonia (GYASA)

Línea investigación : Geomática y agricultura de precisión

Lugar de Ejecución : Fungo Agrícola N° 1 de la UNAS (FUNAS-1) Tingo María

Fecha de inicio : Noviembre del 2021

Fecha de finalización : Abril del 2022

Presupuesto : S/ 7,865.00

Financiamiento : Propio (x) FIF () Externo ()

FEDU : No

Propio : Si

Otros : No

Según: Resolución: N° 461-2023-R-UNAS y Resolución: N° 295-2023-R-UNAS

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por orientarme hacia el camino correcto y por su amor espiritual que me proporcionó la fortaleza y la sabiduría necesarias para completar mi carrera universitaria.

Expreso mi gratitud hacia mis padres, por ser mi respaldo en la consecución de mis metas. No solo me protegieron y aconsejaron, sino que también me inculcaron los valores fundamentales que me han ayudado a desarrollarme como ciudadano.

A mis abuelos, le agradezco su apoyo constante y el afecto fraternal que me brindaron en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva – Tingo María, especialmente a los profesores de la Facultad de Agronomía, quienes han compartido sus valiosas enseñanzas para contribuir a mi formación profesional.
- A mi asesor, el Dr. Victorino Rivas Pulache, cuyo constante respaldo y sabios consejos fueron fundamentales en la conclusión de este trabajo de investigación de tesis.
- Al presidente de jurado, el Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, por su apoyo y orientación durante el proceso de finalización de esta tesis. También quiero destacar la contribución de los miembros del jurado, el Dr. Gilberto Medina Díaz y M. Sc. Jaime Joseph Chávez Matías, por sus sugerencias que enriquecieron la presentación del informe de tesis.
- A mis colegas y amigos, cuyo apoyo fue fundamental en la recolección de datos para la elaboración de esta tesis profesional. Su colaboración ha sido invaluable en este importante logro académico.

ÍNDICE GENERAL

Página

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Distribución espacial	3
2.2.	Métodos de interpolación y extrapolación, utilizados en un SIG.....	3
2.2.1.	Kriging.....	3
2.2.2.	Curvatura mínima (Spline).....	3
2.2.3.	Interpolación ponderada por el inverso a la distancia (IDW).....	3
2.2.4.	Red irregular de triangulación (TIN).....	4
2.2.5.	Método modificado de shepard	4
2.3.	Conceptos básicos.....	4
2.3.1.	Sistema de Información Geográfica (SIG).....	4
2.3.2.	Componentes de un SIG.....	5
2.3.3.	Zonificación agroecológica	6
2.3.4.	Modelamiento espacial geográfico.....	6
2.4.	Suelo	6
2.4.1.	Factores edáficos	6
2.4.1.1.	Importancia.....	6
2.4.1.2.	Muestreo de suelos	7
2.4.1.3.	Tipos de muestreo	7
2.4.1.4.	Formas de muestreo.....	7
2.4.2.	Análisis de suelos	8
2.4.2.1.	Indicadores químicos.....	8
2.4.2.2.	Indicadores físicos	9
2.5.	Fisiografía.....	9
2.6.	Clase de capacidad de uso mayor de las tierras.....	9
2.7.	Clases de tierras aptas para cultivos permanentes (C).....	10
2.8.	Tipos de cultivos según su Capacidad de Uso Mayor	10
2.9.	Interpretación de los resultados	11
2.10.	Manejo de Nutrientes por Sitio Especifico (MNSE).....	11
2.11.	Investigaciones afines	11

III. MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1. Lugar de ejecución.....	13
3.1.1. Zona de vida	13
3.1.2. Registro meteorológico	13
3.1.3. Material, Reactivos, Equipos y Software	14
3.1.4. Ubicación de las calicatas.....	14
3.2. Análisis estadístico	15
3.2.1. Componentes en estudio.....	15
3.2.2. Diseño experimental.....	15
3.2.3. Variables a evaluar	16
3.2.4. Características del campo experimental	16
3.3. Metodología.....	18
3.3.1. Análisis físico-químico del suelo	18
3.3.2. Mapas de distribución espacial.....	18
3.4. Ejecución del experimento	19
3.4.1. Identificación de puntos para las calicatas	19
3.4.2. Realización de las calicatas	19
3.4.3. Muestreo para densidad aparente	19
3.4.4. Muestreo para análisis de caracterización del suelo.....	20
3.4.5. Tapado de las calicatas	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Parámetros físicos del suelo (densidad aparente y textura) en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía.....	21
4.2. Parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible, K disponible, Ca, Mg, K, Na, Al, H, bases cambiabes, acides cambiabes y saturación de aluminio) en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía	24
4.3. Mapas de distribución espacial de los parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible y K disponible) para proponer estrategias de manejo sostenible en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía.....	29
V. CONCLUSIONES	46
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	47
VII. REFERENCIAS.....	48
ANEXOS.....	54

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Datos meteorológicos durante la ejecución del trabajo 2021-2022	14
2.	Componentes en estudio	15
3.	Variables y métodos del análisis físico-químico del suelo	18
4.	Relación de la densidad aparente y textura de las 7 calicatas del FUNAS-I, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la selva	21
5.	Relación de las características química de las 7 calicatas del FUNAS-I, Facultad de Agronomía - UNAS	25
6.	Coordenadas UTM y su altitud de las calicatas del estudio.....	61

ÍNDICE DE FIGURA

Figura	Página
1. Funciones y componentes de un SIG	4
2. Esquema de los componentes de un SIG.	5
3. Capacidad de uso mayor	11
4. Imagen satelital de la ubicación del campo experimental (Google Earth Pro, 2025).	13
5. Imagen satelital de las siete calicatas de estudio dentro del FUNAS-I.....	15
6. Georreferenciación de las áreas ocupadas en el FUNAS-I	17
7. Distribución espacial del pH superficial del fondo de la Facultad de Agronomía.....	30
8. Distribución espacial de la materia orgánica superficial del fondo en la Facultad de Agronomía	32
9. Distribución espacial del nitrógeno superficial del fondo de la Facultad de Agronomía	35
10. Distribución espacial del fosforo disponible superficial del fondo de la Facultad de Agronomía	38
11. Distribución espacial del potasio disponible superficial del fondo de la Facultad de Agronomía	40
12. Distribución espacial de la capacidad de intercambio catiónico de la superficial del fondo de la Facultad de Agronomía	42
13. Imágenes de las calicatas realizadas en el experimento.....	55
14. Análisis de calicata 1 y 2.....	56
15. Análisis de calicata 3 y 4.....	57
16. Análisis de calicata 5 y 6.....	58
17. Análisis de calicata 7.....	59
18. Levantamiento topográfico del FUNAS I, Facultad de agronomía (UNAS).....	60
19. Permiso para la construcción de calicatas en FUNAS I, Facultad de agronomía (UNAS).....	62

RESUMEN

La investigación se enfoca en el análisis de la distribución espacial de los parámetros físico-químicos en el FUNAS I de la Facultad de Agronomía en Tingo María, que comprende 11,4956 ha y se encuentra a 1,2 km de la carretera Fernando Belaunde Terry, en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, en la región de Huánuco. Para asegurar la representatividad de las muestras, se seleccionaron estratégicamente siete calicatas en el área experimental (FUNAS-I), la ubicación de las calicatas y las muestras recolectadas reflejarán adecuadamente las características del área experimental. Los resultados muestran los análisis de suelo efectuados en las calicatas, donde, revelan notables variaciones en las propiedades físico-químicas del suelo en el área de FUNAS-I, a diferentes profundidades. Las discrepancias entre los horizontes A y AC, así como entre las capas 1 y 2, en cuanto al contenido de materia orgánica, nutrientes, pH, densidad aparente y textura del suelo, pueden servir como punto de partida para la implementación de prácticas de Agricultura de Precisión. Además, el análisis de la distribución espacial de los suelos indica predominantemente un pH ligeramente alcalino y neutro, con niveles bajos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, pero adecuados niveles de potasio, lo cual es relevante en el marco Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE) y para cultivos específicos. Las clases texturales mayormente franco y franco arenoso, ofrecen beneficios significativos en términos de permeabilidad y eficiencia agrícola. Destacan el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) como aspectos críticos en las áreas clasificadas como A3, especialmente para prácticas agrícolas intensivas

Palabras claves: Capacidad de uso, Estudio geoestadístico, Fundo Agrícola, FUNAS-I, suelos agrícolas

Spatial Distribution of Some Physical and Chemical Parameters from the School of Agronomy's Farm in Tingo Maria

Abstract

The researched was focused on the analysis of the spatial distribution of the physico-chemical parameters on the school of agronomy's FUNAS I (acronym in Spanish) in Tingo Maria, [Peru,] that is made up of 11.4956 acres and is located at 1.2 kilometers on the Fernando Belaunde Terry highway, in the Rupa Rupa district of the Leoncio Prado province in the Huánuco region. In order to assure the representativeness of the samples, seven test pits were strategically selected from an experimental area (FUNAS-I), the location of the test pits and the samples that were collected adequately reflected the characteristics of the experimental area. The results revealed the analyses of the soil that were carried out in the test pits, where, notable variations in the physico-chemical properties from the soil in the FUNAS-I area were revealed, at different depths. The discrepancies among the A and AC horizons, as well as between layers 1 and 2, with respect to the organic matter content, nutrients, pH, apparent density, and soil texture, could serves as a starting point for the implementation of precise agricultural practices. Moreover, the analysis of the spatial distribution of the soil predominately indicated a slightly alkaline and neutral pH, with low levels of organic matter, nitrogen and phosphorous, but adequate levels of potassium, which was relevant within the framework of the nutrient management by specific site (MNSE- acronym in Spanish) and for specific crops. The textural classes were mostly loam and sandy loam, offering significant benefits in terms of permeability and agricultural efficiency. The pH, organic matter and cation exchange capacity (CEC; CIC in Spanish) stood out as critical aspects in the areas that were classified as A3, especially for the agricultural intensive practices.

Keywords: capacity of use, geostatistical study, agricultural farm, FUNAS-I, agricultural soil

I. INTRODUCCIÓN

El estudio se centra en el análisis de la distribución espacial de los macronutrientes en los suelos del FUNAS-I, empleando técnicas geoestadísticas. Esta perspectiva facilita reconocer patrones y variaciones en la composición edáfica, proporcionando un entendimiento preciso de su heterogeneidad espacial. La finalidad central es construir fundamentos técnicos que avalen la ejecución de una iniciativa orientada a la Agricultura de Precisión, favoreciendo un manejo racional y eficiente del predio agrícola de la Facultad de Agronomía.

La amplia variedad de suelos muchas veces no se aprovecha de la mejor manera, principalmente por el escaso conocimiento que se tiene sobre sus características. Por ello, resulta fundamental analizar con anticipación sus condiciones físicas, químicas y biológicas antes de decidir qué cultivo o actividad agrícola llevar a cabo. Este tipo de evaluación permite dar recomendaciones adaptadas a cada situación, en el marco de un Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE), asegurando así un equilibrio entre lo que extraen los cultivos, la oferta natural del suelo y los aportes que se realicen de manera adicional.

El uso continuo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en otras áreas ha confirmado su valor como herramienta para la toma de decisiones. En agricultura, su utilidad es amplia y abarca temas como la contaminación, la fertilidad y el manejo integral del suelo. Una de sus principales ventajas es la capacidad de analizar la variabilidad espacial y de estimar valores en zonas no muestreadas —como clima o precipitaciones— mediante interpoladores.

Asimismo, determinar la distribución espacial de los parámetros físicos y químicos en el FUNAS-I permite proponer una zonificación ecológica y económica. Esta constituye un instrumento técnico que orienta sobre los usos más apropiados de los espacios y recursos naturales, contemplando actividades agrícolas, ganaderas, forestales, pesqueras, mineras y energéticas, así como acciones de conservación de la biodiversidad, ecoturismo y desarrollo urbano-industrial (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013).

El presente proyecto tiene como objetivo principal llevar a cabo la modelación geoestadística a través de la distribución espacial de diversas propiedades físicas y químicas de los suelos del FUNAS-I. Este análisis se llevará a cabo mediante pruebas de laboratorio con el propósito de evaluar el estado actual del suelo, según su Capacidad de Uso Mayor (CUM), especialmente en un contexto de agricultura migratoria y prácticas de manejo deficientes que resultan en una baja productividad de los cultivos. Ante esta problemática, surge la necesidad de comprender cómo se distribuyen espacialmente los nutrientes del suelo principalmente agrícola del FUNAS I, lo cual permitirá delinear de manera uniforme los nutrientes del suelo. En función de estas consideraciones, se plantean los siguientes objetivos.

Objetivo general

Determinar la distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del suelo en el fundo de la Facultad de Agronomía en Tingo María.

Objetivos específicos

1. Caracterizar los parámetros físicos del suelo (densidad aparente y clase textural) en diferentes áreas del fundo, o unidades fisiográficas de la Facultad de Agronomía, en Tingo María.
2. Evaluar los parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible, K disponible, Ca, Mg, K, Na, Al, H, bases cambiabiles, acides cambiabile y saturación de aluminio) para identificar la fertilidad y posibles limitantes en la producción agrícola en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía, en Tingo María.
3. Elaborar mapas de distribución espacial de los parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible y K disponible, CIC) del fundo de la Facultad de Agronomía, en Tingo María
4. Proponer estrategias de manejo sostenible en el fundo de la Facultad de Agronomía, en Tingo María

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Distribución espacial

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en áreas agrícolas no solo depende de la base geológica que dio origen a su formación, sino también de las prácticas de manejo aplicadas, como la labranza. La interacción entre estos factores genera cambios que se manifiestan en distintas escalas espaciales y temporales, mientras que, a nivel local, procesos como la erosión y la deposición introducen modificaciones adicionales (Iqbal et al., 2005).

Reconocer la importancia de esta variabilidad resulta fundamental para aplicar estrategias de manejo que optimicen el uso de recursos como agua y nutrientes, reduciendo al mismo tiempo los efectos negativos sobre el ambiente (Obando et al., 2006). Las prácticas agrícolas, en particular, inciden de manera significativa en características como la porosidad y la estructura del suelo. Un caso ilustrativo de esta influencia es la estacionalidad en los análisis químicos: al evaluar elementos como nitrógeno o azufre, el momento del muestreo es determinante, ya que estos nutrientes están fuertemente condicionados por factores ambientales. En consecuencia, un muestreo realizado en verano no reflejaría de manera adecuada el contenido de nitrógeno disponible en primavera (Jaramillo et al., 2008).

2.2. Métodos de interpolación y extrapolación, utilizados en un SIG

2.2.1. Kriging

Es un método geoestadístico de interpolación espacial que permite generar superficies tridimensionales a partir de datos distribuidos de forma irregular, ofreciendo alta capacidad predictiva incluso con pocos puntos de muestreo. Su eficacia depende del conocimiento del usuario y se basa en la suposición de homogeneidad estadística en la variación espacial (Fallas, 2003).

2.2.2. Curvatura mínima (Spline)

El método de interpolación Spline calcula valores mediante una función matemática que minimiza la curvatura de la superficie, generando un ajuste uniforme y preciso a los puntos de entrada. Conceptualmente puede imaginarse como una lámina elástica que atraviesa los puntos de muestra, manteniendo la suavidad del conjunto y asegurando que la superficie resultante pase por cada uno de ellos (Chica, 2018).

2.2.3. Interpolación ponderada por el inverso a la distancia (IDW)

La interpolación por distancia inversa ponderada (IDW) permite estimar valores de una superficie combinando puntos de muestra a través de una relación lineal donde

los pesos se asignan en función inversa a la distancia, lo que implica que los puntos cercanos ejercen mayor influencia en el valor calculado mientras que los más alejados tienen menor efecto; de acuerdo con Vargas et al. (2023), esta técnica parte de la premisa de que la variable depende de la ubicación y su influencia disminuye con la distancia, mientras que Guerrero (2015) señala que al incrementar el exponente de ponderación se intensifica el peso de los puntos más próximos.

2.2.4. Red irregular de triangulación (TIN)

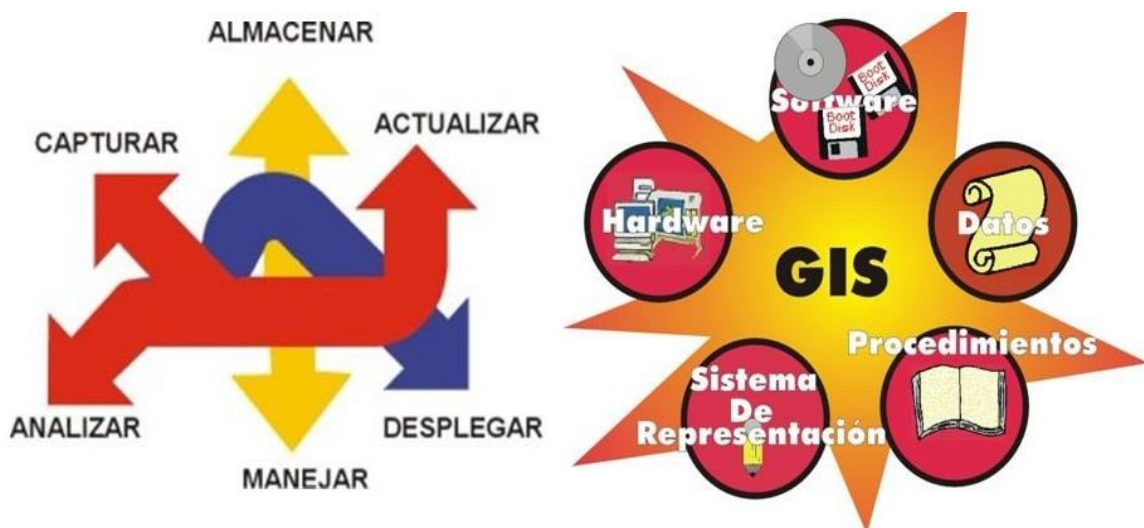
Se construye a partir de triángulos que se conectan sin superponerse y se generan a partir de puntos distribuidos de manera irregular, lo que permite representar con detalle las formas del terreno y, al mismo tiempo, conservar la información sobre la relación entre los triángulos vecinos; esta estructura facilita describir con precisión las irregularidades de la superficie y resulta especialmente útil en terrenos con variaciones marcadas, ya que posibilita calcular métricas como la pendiente, la orientación y el sombreado, ofreciendo así una representación flexible y fiel de la topografía del paisaje (Fallas, 2003).

2.2.5. Método modificado de Shepard

El método modificado de Shepard, similar al de Ponderación por Distancia Inversa, se distingue por asignar los pesos considerando tanto la proximidad de los puntos cercanos como la influencia de los más alejados, lo que le otorga mayor flexibilidad y precisión en la representación de superficies complejas (Esri, 2006).

2.3. Conceptos básicos

2.3.1. Sistema de Información Geográfica (SIG)



Fuente: Meza (2014).

Figura 1. Funciones y componentes de un SIG

El espacio geográfico puede entenderse como el conjunto de entidades localizadas y sus atributos, organizados mediante bases de datos que combinan información gráfica y alfanumérica; en este marco, los Sistemas de Información Geográfica constituyen herramientas que permiten recopilar, procesar y analizar datos georreferenciados a través de capas temáticas y atributos asociados, lo que posibilita realizar operaciones como superposiciones, reclasificaciones y consultas para la toma de decisiones, integrando distintos tipos de información y facilitando el análisis de las relaciones espaciales (Buzai, 2013; Meza, 2014).

2.3.2. Componentes de un SIG

Está conformado por distintos elementos que actúan de manera conjunta para garantizar su funcionamiento, entre ellos se encuentran los equipos que deben contar con la capacidad de procesamiento y almacenamiento suficiente para ejecutar los programas, el software que integra las herramientas necesarias para la entrada, análisis y representación de los datos, la base de datos que constituye el núcleo del sistema y de cuya calidad depende la confiabilidad de los resultados, el recurso humano que incluye tanto a quienes manejan el software como a quienes gestionan la información y comprenden los alcances de los proyectos, y finalmente los procedimientos que establecen la organización del trabajo y permiten dar orden y coherencia a todo el proceso, lo que asegura que el sistema cumpla con los objetivos propuestos (Sastre, 2010; Rojas, 2010).



Figura 2. Esquema de los componentes de un SIG

2.3.3. Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica (ZAE), de acuerdo con la (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) FAO, delimita áreas en función de factores como suelo, clima y fisiografía, considerando además los requerimientos de los cultivos y sus sistemas de manejo. Cada zona combina limitaciones y potencialidades similares, lo que la convierte en una herramienta clave para orientar el uso sostenible de la tierra, aumentar la productividad o reducir la degradación de recursos. En este sentido, la ZAE identifica espacios relativamente homogéneos según características físicas y biológicas, vinculadas a su potencial de uso (Espinoza, 2006). Asimismo, permite diferenciar unidades dentro de un ecosistema para planificar sistemas de producción adecuados, establecer prioridades de investigación y facilitar la transferencia tecnológica, siendo las condiciones ecológicas clima, suelo y topografía los criterios principales para definir dichas unidades (Suárez, 2014).

2.3.4. Modelamiento espacial geográfico

Puede entenderse como la organización de la información que define la estructura de las tablas, sus relaciones y otros elementos vinculados, y en el campo geográfico se traduce en una representación abstracta del mundo real construida a partir de objetos y datos que pueden mostrarse en mapas y utilizarse para realizar consultas, ediciones y análisis, de modo que en los Sistemas de Información Geográfica la manera en que se representa y examina la información depende directamente del modelo geográfico adoptado (Tapia, 1999).

2.4. Suelo

Se entiende como una entidad natural formada por la interacción del clima, los organismos vivos y los materiales litológicos, que ocupa una posición específica en el relieve a lo largo del tiempo; en el ámbito agrícola, no solo representa el soporte físico de las plantas, sino también un reservorio fundamental de nutrientes que posibilita su crecimiento y desarrollo, por lo que su adecuada gestión resulta esencial para garantizar la producción; en este sentido, la adopción de prácticas de conservación que preserven su calidad y promuevan un uso racional de la tierra permite mejorar los rendimientos y reducir los efectos negativos de la erosión (Burbano-Orjuela, 2016; Jaramillo, 2002; Constantinesco, 1976).

2.4.1. Factores edáficos

2.4.1.1. Importancia

La composición de la vegetación en una formación determinada está influenciada por diversos factores, entre los cuales el suelo ocupa un lugar central al incidir directamente en la distribución de los árboles, su crecimiento, la forma y calidad de la madera,

así como en su tolerancia y capacidad de regeneración; la presencia de ciertos tipos de suelo puede favorecer la dominancia de especies específicas y, en consecuencia, definir la estructura y el estado de conservación del bosque, de modo que la relación entre las características edáficas y la vegetación resulta clave para comprender la dinámica y diversidad de los ecosistemas forestales en un contexto climático particular (Mora et al., 2015; Castilla, 2015).

2.4.1.2. Muestreo de suelos

Establece un paso decisivo para asegurar la confiabilidad de los análisis, ya que incluso con tecnología y equipos de laboratorio avanzados una muestra mal obtenida puede alterar los resultados; este procedimiento debe considerar las variaciones propias del suelo en cuanto a profundidad y extensión, lo que dificulta establecer un método único y exige ajustar la técnica al propósito del estudio, además es fundamental que el trabajo en campo y en laboratorio sea realizado por personal capacitado y que se utilicen de manera correcta los instrumentos y reactivos, garantizando así que las muestras sean representativas y los resultados fiables (Environmental Law Alliance Worldwide [ELAW], 2021; Red de Buenas Prácticas Agrícolas [RedBPA], 2020; ICTA, 2011).

2.4.1.3. Tipos de muestreo

El muestreo del perfil del suelo consiste en extraer muestras de cada horizonte hasta llegar a la sección de control, lo que permite obtener información clave para la clasificación taxonómica, la cartografía detallada y la evaluación de la fertilidad potencial del terreno, aportando una visión completa de la composición y propiedades en profundidad; por su parte, el muestreo superficial se centra en la capa cultivable, generalmente entre 20 y 30 cm, con el objetivo de diagnosticar la fertilidad actual y orientar programas de fertilización, proporcionando datos inmediatos sobre el estado nutricional del suelo que resultan fundamentales para diseñar estrategias de manejo agrícola y mejorar la productividad, de modo que ambos métodos se complementan al ofrecer perspectivas distintas y necesarias para la gestión y comprensión de los suelos (ICTA, 2011; Azabache, 2003).

2.4.1.4. Formas de muestreo

Debe contemplar la variabilidad horizontal y vertical para obtener resultados representativos, por lo que se recomienda el muestreo compuesto, que consiste en combinar entre veinte y treinta submuestras tomadas al azar en un área homogénea, todas con el mismo volumen y extraídas mediante un corte en forma de “V” o rectangular; antes de iniciar, es necesario limpiar la superficie para evitar contaminaciones y se deben excluir zonas poco representativas como bordes de zanjas, acumulaciones de residuos, áreas quemadas o con exceso de sales, garantizando así la calidad y precisión del análisis (Azabache, 2003).

2.4.2. Análisis de suelos

Es un procedimiento orientado a determinar su fertilidad mediante métodos físicos y químicos, que consiste en separar un componente del suelo en función de su composición para transformarlo en una forma que pueda ser identificada y medida mediante las técnicas analíticas propias del método empleado (Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas [ICTA], 2011).

2.4.2.1. Indicadores químicos

El análisis químico del suelo permite conocer el pH y la disponibilidad de nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas, información que resulta fundamental para ajustar la fertilización, elegir los cultivos más adecuados y lograr mejores rendimientos (García et al., 2012).

- **pH del suelo:** regula procesos químicos, biológicos y la disponibilidad de nutrientes. En suelos alcalinos predominan macronutrientes y molibdeno; en ácidos, micronutrientes como Fe, Mn, Zn, Cu y B (Rodríguez, 2011).
- **Conductividad eléctrica (CE):** indica el contenido de sales; niveles altos afectan el crecimiento y el microbiota, además de ser indicador de salinización y erosión (Porta et al., 2003).
- **Materia orgánica:** mejora la CIC, regula el pH, retiene humedad y favorece la estructura del suelo (Leyton, 2003).
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** mide la cantidad de cationes que el suelo puede retener, expresada en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ (Porta et al., 2003).
- **Nutrientes:** se dividen en macro (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (Fe, Zn, Mn, B, Cu, Mo, Cl), ambos indispensables para el metabolismo vegetal (Benton, 2012).
- **Nitrógeno:** presente principalmente en la materia orgánica, se libera durante la descomposición y muestra gran variabilidad en el suelo (Navarro, 2003).
- **Fósforo:** de baja movilidad, su disponibilidad depende del pH, la actividad microbiana y la presencia de Fe, Al, Mn o Ca, que lo fijan en suelos ácidos o alcalinos (Azabache, 2003).
- **Potasio:** proviene de minerales arcillosos, meteorización y fertilización; se encuentra en formas intercambiables y no intercambiables (Conti, 2004).
- **Micronutrientes:** su disponibilidad está influenciada por pH y materia orgánica, que forma complejos quelados con metales, mejorando su estabilidad y absorción (Sposito, 2008).

2.4.2.2. Indicadores físicos

La calidad del suelo puede evaluarse a partir de distintos indicadores físicos, que dependen de las características del área de estudio. Entre los más relevantes se encuentran la textura, la densidad aparente y la porosidad, además de la profundidad, la infiltración y la capacidad de retención de agua.

- **Textura:** corresponde a la proporción de arena, limo y arcilla en la fracción mineral <2 mm. Según estas combinaciones, los suelos se agrupan en 12 clases texturales propuestas por el USDA (FAO, 2009).
- **Densidad aparente (DA) y porosidad:** la DA se calcula como la relación entre la masa del suelo seco y su volumen total (incluyendo poros). La porosidad expresa el porcentaje de espacios vacíos, diferenciándose en macroporos (aire) y microporos (agua) (Porta et al., 2009).

2.5. Fisiografía

La geomorfología estudia las formas de la superficie terrestre o paisajes, clasificándolos según su morfología, origen, edad, morfometría y factores como clima, hidrología y geología, considerando su influencia en la pedogénesis y en el uso del suelo. La clasificación incluye distintos niveles:

- **Gran paisaje:** definido por el relieve, con tres categorías principales: planicie, colinoso y montañoso.
- **Paisaje:** determinado por la litología y el origen de las formas terrestres.
- **Subpaisaje:** resultado de procesos erosivos o deposicionales.
- **Elemento de paisaje:** definido por criterios específicos como pendiente, drenaje, disección o riesgo de inundación.

Cada tipo de suelo se asocia a un paisaje particular, influenciado directamente por el relieve, aunque las variaciones en el material parental y en el perfil edáfico responden a diferencias en la posición y forma del terreno (Brindis et al., 2020).

2.6. Clase de capacidad de uso mayor de las tierras

En el sistema de clasificación de tierras, la segunda categoría jerárquica agrupa suelos según su calidad agrológica dentro de cada Grupo de Capacidad de Uso Mayor (CUM). Aunque comparten una vocación de uso general similar, difieren en su potencial productivo y limitaciones, lo que exige distintos niveles de manejo.

La calidad agrológica integra aspectos de fertilidad, propiedades físicas, relaciones suelo-agua, relieve y clima, reflejando la capacidad del suelo para sostener cultivos bajo prácticas específicas. Se clasifica en tres niveles:

- **Alta (A1):** tierras de mayor potencial, con mínimas limitaciones y aptas para una amplia variedad de cultivos. Requieren prácticas de manejo simples.
- **Media (A2):** suelos con limitaciones moderadas de tipo climático, edáfico o topográfico, que reducen la diversidad de cultivos. Necesitan un manejo y conservación intermedios.
- **Baja (A3):** tierras con fuertes limitaciones que restringen la producción y requieren prácticas de manejo intensivas y especializadas para mantener la productividad.

Este sistema permite diferenciar con claridad las posibilidades de uso y las restricciones de cada suelo, orientando el manejo sostenible de los recursos

2.7. Clases de tierras aptas para cultivos permanentes (C)

Las clases C1, C2 y C3 agrupan tierras con limitaciones crecientes de uso edáfico, que pueden sostener cultivos permanentes como frutales, especies industriales, pastos o recursos forestales siempre que se apliquen prácticas de manejo adecuadas.

- **C1 (alta):** tierras de mejor calidad, con mínimas restricciones, aptas para una amplia gama de cultivos permanentes, especialmente frutales. Requieren prácticas de manejo simples para mantener la productividad.
- **C2 (media):** suelos con limitaciones moderadas de origen climático, edáfico o topográfico, que reducen la diversidad de cultivos. Exigen un manejo y conservación de intensidad intermedia.
- **C3 (baja):** tierras con fuertes restricciones que dificultan el establecimiento exitoso de cultivos permanentes. Necesitan prácticas intensivas de manejo y conservación para evitar su deterioro y sostener la producción.

2.8. Tipos de cultivos según su Capacidad de Uso Mayor

La Capacidad de Uso Mayor de una región se define como su propensión natural para producir de manera consistente bajo tratamientos continuos y usos específicos. Las interpretaciones ofrecen predicciones sobre el comportamiento del suelo y los resultados esperados en condiciones particulares de clima, alivio y manejo del suelo. Representa un sistema predominantemente técnico e interpretativo que tiene como único propósito asignar a cada unidad de suelo el uso y manejo más adecuado. Esta tarea, conocida como "interpretación",

traduce el lenguaje científico del estudio de suelos a un lenguaje práctico para orientar decisiones efectivas en el manejo de recursos (Sadeghian, 2018).

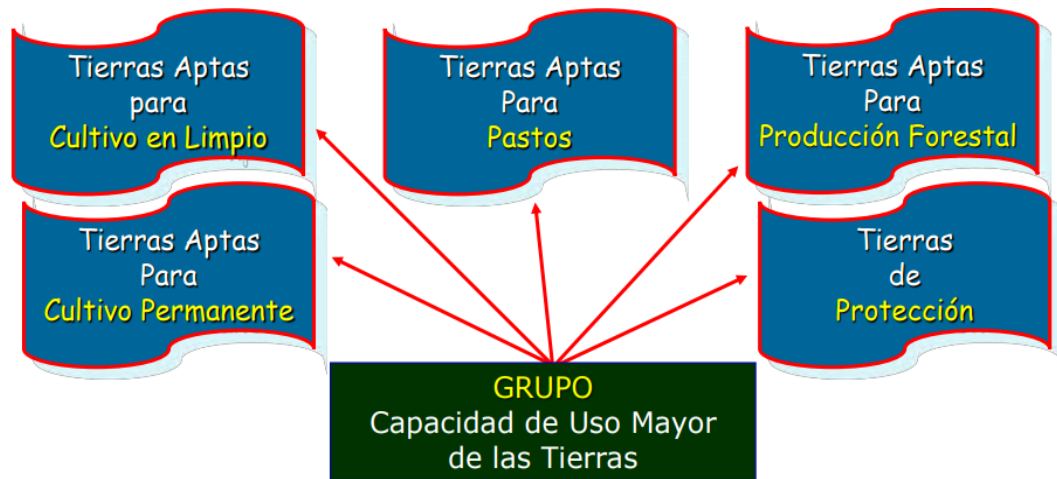


Figura 3. Capacidad de uso mayor

2.9. Interpretación de los resultados

El análisis de suelos permite relacionar la disponibilidad de nutrientes con la respuesta de las plantas a la fertilización, clasificando dicha disponibilidad en niveles bajo, medio y alto. Su interpretación se basa en la correlación entre los resultados químicos del suelo y la reacción de los cultivos ante prácticas como la fertilización o la aplicación de cal, evaluadas en condiciones de campo (Sadeghian, 2018).

2.10. Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE)

Es una metodología que suministra a las plantas la cantidad exacta de nutrientes en el momento oportuno para alcanzar altos rendimientos, compensando el déficit entre la demanda del cultivo y la disponibilidad natural del suelo. Basado en la comparación entre parcelas con fertilización completa y parcelas de omisión, permite ajustar dosis y tiempos de aplicación, logrando mayor eficiencia agronómica y sostenibilidad en la producción (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias [INIAP], 2011; IPNI; Cabero, 2014).

2.11. Investigaciones afines

En su tesis sobre manejo de nutrientes por sitio específico en maíz en Ecuador, Cabero (2014) concluyó que el mayor rendimiento de grano (8,216 t/ha) se alcanzó con la dosis de 180-150-40-30 kg/ha de N, P, K, S y Mg, registrando eficiencias agronómicas de 11.17, 5.99, 11.00 y 16.73 kg de maíz por cada kg de elemento aplicado. De manera complementaria, Rodríguez et al. (2008), en un ensayo en el Centro Agropecuario Marengo (Colombia),

evaluaron la fertilidad del suelo bajo un enfoque de manejo por sitio específico mediante una cuadrícula de muestreo de 32 puntos y el análisis de múltiples variables químicas, físicas y de rendimiento. Identificaron dos zonas de manejo diferenciadas (AP1 y AP2) y las compararon con un testigo de fertilización convencional (CAM1 y CAM2), aplicando análisis geoestadísticos y económicos. Los resultados mostraron que la metodología permitió definir distancias óptimas de muestreo y que los mayores rendimientos y beneficios económicos se obtuvieron en la zona AP1, validando la eficacia del manejo de la fertilidad por sitio específico en maíz.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se desarrolló en el Fundo Agrícola N.º 1 de la Facultad de Agronomía de la UNAS (FUNAS-I), con una superficie de 11,4956 ha, ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, a 1,2 km de la carretera Fernando Belaunde Terry. El área se localiza a 657 m s. n. m., con coordenadas UTM 390636 m E y 8969865 m N (Figura 4).



Figura 4. Imagen satelital de la ubicación del campo experimental (Google Earth Pro, 2025)

3.1.1. Zona de vida

Tingo María pertenece a la zona de Bosque Húmedo Premontano Tropical (bh-PMT), con una temperatura entre 18-28 °C y precipitación de 2,000-4,000 mm anuales, condiciones que favorecen una alta biodiversidad y alta vegetación (Manrique, 2022).

3.1.2. Registro meteorológico

Durante la ejecución del trabajo (2021-2022), los datos meteorológicos registraron variaciones en temperatura, humedad relativa y precipitación (Tabla 1). La temperatura máxima osciló entre 29,13 °C en febrero y 31,29 °C en enero, mientras que la mínima fluctuó entre 20,57 °C en febrero y 21,37 °C en diciembre; la humedad relativa presentó valores entre 81,71 % en enero y 86,60 % en noviembre, mostrando una tendencia a disminuir conforme avanzaban los meses; en cuanto a la precipitación, se registraron los mayores valores

en enero (545,80 mm/día) y febrero (520,60 mm/día), mientras que abril presentó el menor registro (282,30 mm/día).

Tabla 1. Datos meteorológicos durante la ejecución del trabajo 2021-2022

Meses	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)	Precipitación (mm/mes)
	Max	Min		
Noviembre 2021	29,75	21,01	86,60	415,80
Diciembre 2021	30,44	21,37	84,60	480,80
Enero 2022	31,29	20,98	81,71	545,80
Febrero 2022	29,13	20,57	85,38	520,60
Marzo 2022	29,62	20,76	84,71	400,70
Abril 2022	30,65	21,08	83,23	282,30

3.1.3. Material, Reactivos, Equipos y Software

Se utilizaron una variedad de herramientas y recipientes, como tubos muestreadores, bolsas transparentes, vasos de recipiente, probetas, pipetas, tubos de ensayo, gradillas, rejillas, vasos de plástico, embudos, fiola, matraz, entre otros. Se emplearon diversos reactivos, como hexametáfosfato de sodio, ácido sulfúrico, dicromato de potasio, sal de moho, bicarbonato, cloruro de potasio, naftalina, hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, entre otros.

Se utilizaron equipos especializados como molinos de suelos, balanzas, estufas, muflas, agitadores, absorción UV, espectroscopia de absorción atómica, equipos receptores GPS, USB y laptop. Además, se emplearon software y material cartográfico como ArcGIS, Google Earth Pro, ArcMap, y Microsoft Office, junto con imágenes satelitales para analizar y visualizar los datos recopilados.

3.1.4. Ubicación de las calicatas

La Figura 5 muestra la distribución de las siete calicatas realizadas en el Fundo Agrícola de la Facultad de Agronomía, utilizando imágenes satelitales de Google Earth para su ubicación precisa. Las calicatas están representadas por puntos amarillos numerados del 01 al 07 y se encuentran dentro del área delimitada por un polígono blanco, que marca los límites del área de estudio. Se observa que las calicatas fueron ubicadas estratégicamente en diferentes sectores del fundo, asegurando un muestreo representativo de la variabilidad del suelo en la zona. La distribución de los puntos abarca tanto áreas cercanas a las edificaciones e infraestructura de la facultad, como zonas más alejadas en terrenos de cultivo y áreas boscosas, permitiendo una evaluación integral de las condiciones edáficas del sitio. Esta disposición facilita el análisis comparativo entre diferentes sectores del fundo, garantizando la fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio. En la Tabla 18, se encuentran las Coordenadas UTM de cada calicata.



Figura 5. Imagen satelital de ubicación de las siete calicatas dentro del FUNAS-I

3.2. Análisis estadístico

3.2.1. Componentes en estudio

Se evaluaron las calicatas como método principal para el análisis del suelo (Tabla 2), estas evaluaciones se realizaron en el Fundo de la Facultad de Agronomía UNAS (FUNAS I), que funcionó como unidad experimental. La información obtenida incluyó el análisis físico-químico del suelo y la elaboración de mapas de distribución espacial.

Tabla 2. Componentes en estudio

Características	Unidad Experimental	Salida
Calicatas	Fundo de la Facultad de Agronomía UNAS (FUNAS I)	Análisis físico-químico y mapas de distribución espacial

3.2.2. Diseño experimental

El estudio se realizó mediante un análisis descriptivo de las características físicas y químicas del suelo a partir de calicatas. En lo físico, se evaluó la densidad aparente (DA) y la textura; en lo químico, el pH, la materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) disponibles, además de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Los resultados fueron interpretados mediante la elaboración de mapas de distribución espacial.

3.2.3. Variables a evaluar

- **Variables dependientes**
 - Análisis físico de suelo:
 - Densidad aparente
 - Textura
 - Análisis químico
 - pH
 - Materia orgánica
 - Nitrógeno
 - Fósforo disponible
 - Potasio disponible
 - Capacidad de intercambio catiónico
- **Variable independiente**
 - Calicatas
 - Horizontes
 - Capas

3.2.4. Características del campo experimental

El campo experimental de FEUNAS I, perteneciente a la Facultad de Agronomía (UNAS), se caracteriza por una distribución estratégica de áreas agrícolas destinadas a la producción y experimentación (Figura 6).

El Levantamiento Topográfico del Predio Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, georreferenciado en coordenadas UTM (Zona 18) y a escala 1:1000. El área delimitada con una línea azul corresponde al perímetro del predio, el cual comprende parcelas con cultivos como cítricos, cacao, ají, arroz, maíz, bambú y purma, además de módulos especializados como viveros, invernaderos, almacenes, estacionamientos y el módulo de la facultad, lo que evidencia una infraestructura adecuada para la actividad académica y experimental. La delimitación precisa mediante coordenadas y la implementación de puntos de control permiten un manejo espacial confiable. Asimismo, la georreferenciación y los sistemas de medición implementados facilitan el monitoreo edafoclimático, permitiendo una planificación eficiente y sostenible en las actividades de investigación y enseñanza agrícola. El plano incluye tablas de coordenadas, leyenda, escala gráfica.

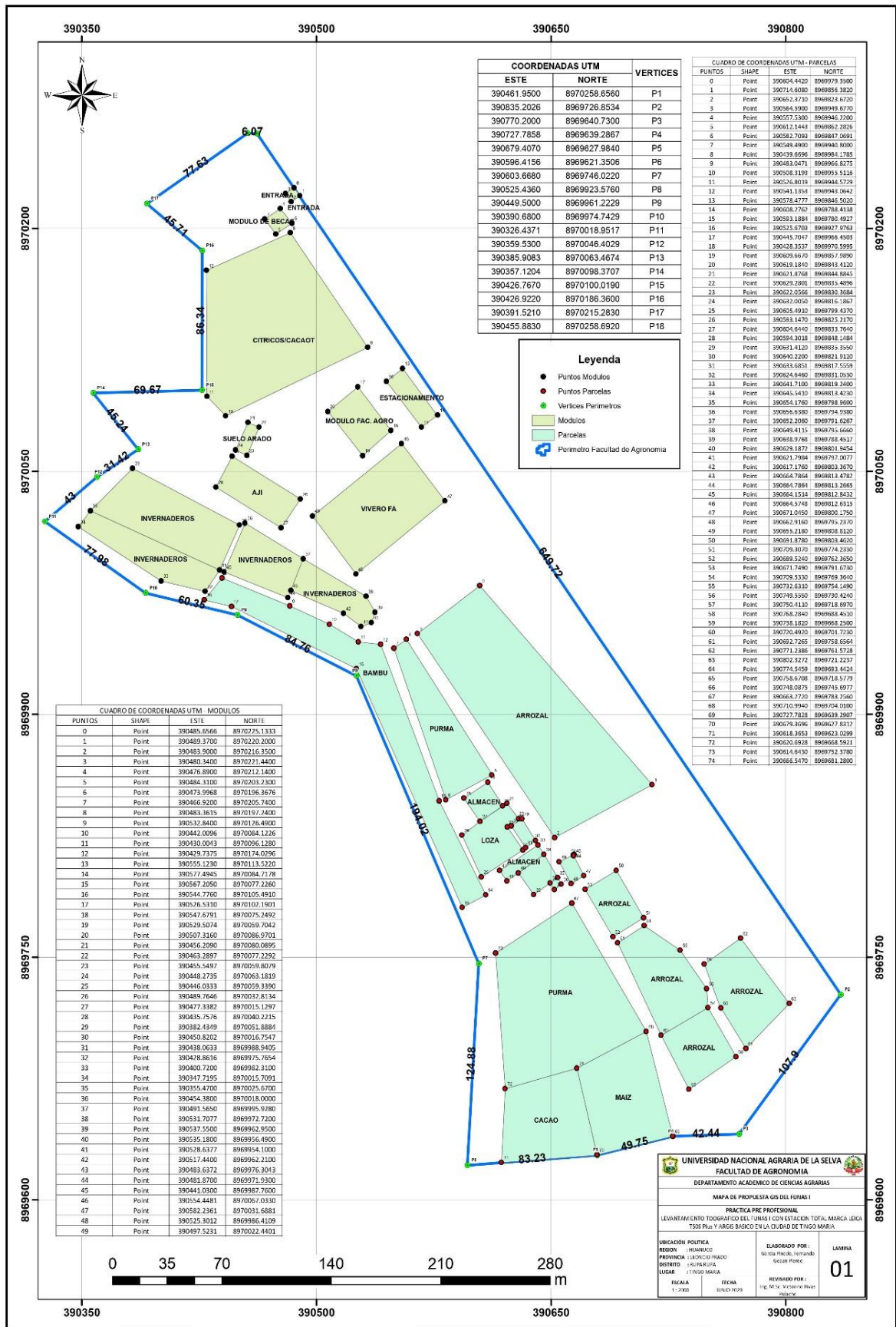


Figura 6. Georreferenciación de las áreas ocupadas en el FUNAS-I

3.3. Metodología

3.3.1. Análisis físico-químico del suelo

Se realizaron evaluaciones de diversas variables a partir de muestras de suelo extraídas de siete calicatas, considerando cada horizonte (Hz) o capa (Cp) tras su apertura. En primer lugar, se identificaron los horizontes y capas en cada calicata para proceder con el muestreo correspondiente. Las muestras fueron tomadas de cada horizonte y codificadas según el número de calicata, Hz o Cp. Para la determinación de la densidad aparente, se empleó el método del cilindro, utilizando un tubo metálico de 7,5 cm de diámetro y 7,5 cm de altura, con un volumen aproximado de 330 cm³, lo que permitió obtener muestras representativas sin alterar la estructura del suelo. Además, se tomaron muestras de cada horizonte para el análisis de textura, pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) disponible, potasio (K) disponible y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Cada muestra tenía un peso aproximado de 1 kg y fue almacenada en bolsas plásticas transparentes debidamente etiquetadas para su correcta identificación. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelos, Agua y Toxicología de la Facultad de Agronomía para su respectivo análisis (Tabla 3).

Tabla 3. Variables y métodos del análisis físico-químico del suelo

Variable	Método	Unidad
Densidad aparente	Cilindro volumétrico	g/cm ³
Textura	Bouyoucos	%
pH	Potenciometría	(1:1)
Materia Orgánica (MO)	Walkley-Black	%
Fósforo disponible (P)	Olsen	ppm
Potasio disponible (K)	Acetato de amonio 1N, Fometría	Ppm
CIC	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Calcio (Ca ²⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Magnesio (Mg ²⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Sodio (Na ⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Potasio (K ⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Aluminio (Al ³⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg
Hidrogeno (H ⁺)	Acetato de amonio 1N, Absorción	cmol(+)/kg

3.3.2. Mapas de distribución espacial

Para la elaboración de mapas de distribución espacial de los parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible y K disponible, CIC), se realizaron siete calicatas y se recolectaron muestras de suelo de los diferentes horizontes. Sin embargo, para la construcción de los mapas solo se utilizaron los resultados del análisis del primer horizonte de

cada calicata. Los datos obtenidos fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante el software ArcGIS 10.8, donde se analizó su distribución espacial utilizando interpolaciones geoestadísticas como Kriging, IDW y Spline. Posteriormente, se generaron mapas temáticos de pH, MO, N, P y K. Para la clasificación de los valores en los mapas, se trabajó con un rango de 8 a 10 clases, permitiendo representar con mayor precisión la variabilidad espacial de los parámetros analizados.

3.4. Ejecución del experimento

3.4.1. Identificación de puntos para las calicatas

La ejecución del experimento inició con la prospección del terreno, donde se identificaron siete puntos estratégicos de muestreo. En cada uno de estos puntos se realizó una calicata con el asesoramiento del asesor, y el apoyo de un mapa satelital obtenido mediante Google Earth Pro (2021). La ubicación de los puntos de muestreo se estableció de manera estratégica para garantizar una cobertura representativa de todas las áreas de producción dentro del fundo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (FUNAS-I).

3.4.2. Realización de las calicatas

Después de identificar los siete puntos estratégicos dentro del FUNAS-I, se excavó una calicata en cada punto con dimensiones aproximadas de $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1$ a 1.20 m , asegurando paredes verticales orientadas de manera que la luz solar incidiera directamente sobre ellas, facilitando la identificación de los horizontes y capas del suelo. La delimitación de los horizontes se realizó en función de sus características morfológicas, principalmente el color. La profundidad de las calicatas varió según la presencia del nivel freático o la presencia de gravas y piedras, factores que determinaron el límite de excavación en cada punto.

3.4.3. Muestreo para densidad aparente

Después de excavadas las calicatas e identificados los horizontes del suelo, se realizó el muestreo con un cilindro volumétrico para determinar la densidad aparente. En cada horizonte identificado, se seleccionó un punto representativo donde el cilindro se insertó verticalmente con golpes suaves de un martillo de goma, asegurando su correcta penetración sin compactar ni alterar la muestra. Una vez lleno, se extrajo con cuidado utilizando un cuchillo para separar el suelo circundante y se sellaron ambos extremos del cilindro con tapas de goma para preservar su estructura original. Finalmente, las muestras fueron etiquetadas con el código de la calicata y el horizonte correspondiente, y transportadas al laboratorio para su análisis

3.4.4. Muestreo para análisis de caracterización del suelo

Después de completar el muestreo para el análisis de densidad aparente, se procedió con el muestreo para la caracterización del suelo. Este proceso consistió en la extracción de muestras de suelo de cada horizonte en cada calicata, utilizando un cuchillo para recolectar el material sin alterar su estructura. Aproximadamente 1 kg de suelo fue colocado en una bolsa de plástico limpia y debidamente etiquetada con el código de identificación de la calicata, el horizonte correspondiente y la fecha de muestreo. Finalmente, las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología para su respectivo análisis, donde se evaluaron sus propiedades físicas y químicas.

3.4.5. Tapado de las calicatas

Después de completar el muestreo, se procedió al tapado de las calicatas con el propósito de prevenir accidentes y evitar que personas o animales pudieran caer en ellas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros físicos del suelo (densidad aparente y textura) en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía

Los resultados del análisis de densidad aparente (Da) y textura de suelo revelan variaciones significativas entre horizontes y capas a lo largo del perfil edáfico en las siete calicatas evaluadas (Tabla 4)

Tabla 4. Relación de la densidad aparente y textura de las 7 calicatas del FUNAS-I, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la selva

Calicatas	Horizontes o Capas	Densidad aparente g/cc	Arena	Arcila	Limo	Clase textural
C1	Hz A	1,25	42,00	22,00	36,00	Franco
	Hz AC	1,35	39,00	24,00	37,00	Franco
	Cp1	1,47	85,00	13,00	2,00	Arena Franca
	Cp2	1,61	81,00	14,00	5,00	Arena Franca
C2	Hz A	1,25	55,00	17,00	28,00	Franco Arenoso
	Hz AC	1,32	51,00	24,00	25,00	Franco Arcilloso Arenoso
	C1	1,35	53,00	28,00	19,00	Franco Arcilloso Arenoso
C3	Hz O	1,00	0,00	0,00	0,00	Orgánico
	Hz A	1,22	67,00	14,00	19,00	Franco Arenoso
	C1	1,14	46,00	20,00	31,00	Franco
	C2	1,39	45,00	22,00	33,00	Franco
C4	Hz O	0,90	0,00	0,00	0,00	Orgánico
	Hz A	1,16	59,00	16,00	25,00	Franco Arenoso
	C1	1,61	83,00	12,00	5,00	Arena Franca
	C2	1,61	85,00	12,00	3,00	Arena franca
	C3	1,56	85,00	11,00	4,00	Arena Franca
C5	Hz A	1,06	50,00	16,00	34,00	Franco
	Hz AC	1,14	44,00	19,00	37,00	Franco
	C1	1,56	79,00	12,00	9,00	Arena Franca
	C2	1,56	85,00	12,00	3,00	Arena Franca
C6	Hz A	1,19	41,00	16,00	43,00	Franco
	Hz AC	1,28	53,00	14,00	33,00	Franco Arenoso
	C1	1,52	83,00	12,00	5,00	Arena Franca
	C2	1,56	93,00	7,00	0,10	Arena
	C3	1,67	91,00	8,00	1,00	Arena
C7	Hz A	1,30	47,00	20,00	33,00	Franco
	C1	1,52	85,00	10,00	5,00	Arena Franca
	C2	1,39	23,00	22,00	25,00	Franco Arcilloso Arenoso
	C3	1,28	54,00	21,00	25,00	Franco Arcilloso Arenoso

En la Calicata 1 (C1), se observa que el horizonte A presenta una menor densidad aparente (1,25 g/cm³) en comparación con el horizonte AC (1,35 g/cm³), lo cual sugiere una estructura más suelta en la superficie del suelo. Esta tendencia también se mantiene entre las

capas C1 y C2, cuyos valores aumentan de 1,47 a 1,61 g/cm³ respectivamente, evidenciando mayor compactación con la profundidad. Aunque ambos horizontes comparten una clasificación textural franco, las pequeñas variaciones en las proporciones de arena, arcilla y limo podrían influir en la capacidad de retención de agua y nutrientes. Según Brady y Weil (2008), la densidad aparente está estrechamente relacionada con la textura del suelo y su porosidad.

En la Calicata 2 se observa un incremento gradual de la compactación, que pasa de 1,25 g/cm³ en el horizonte A a 1,35 g/cm³ en la capa C1, acompañado de un cambio en la textura desde franco arenoso hasta franco arcilloso arenoso. Estas variaciones se explican por procesos pedogenéticos como la meteorización y la acumulación diferenciada de partículas, lo que coincide con lo descrito por Buol et al. (2003) y Hillel (2004). La mayor compactación en los estratos profundos puede limitar la infiltración del agua y restringir el crecimiento de las raíces, tal como advierten Soane et al. (2010) y Arvidsson et al. (2012).

La Calicata 3 (C3) muestra un incremento de la Da de 1,21 a 1,47 g/cm³ hacia capas más profundas, destacando un cambio textural desde franco arenoso en la superficie a franco en profundidad. Esta transición puede afectar la porosidad, permeabilidad y retención de agua del suelo, influyendo en el crecimiento vegetal (Brady & Weil, 2008; Hillel, 2004). Asimismo, los cambios en la proporción de arena, limo y arcilla muestran la evolución estructural del perfil del suelo, un aspecto que resulta clave al momento de planificar las prácticas agrícolas

En la Calicata 4 (C4), la densidad aparente se eleva de 1,00 g/cm³ en el horizonte O a 1,61 g/cm³ en C2, lo que refleja un nivel marcado de compactación. La textura cambia de franco arenoso a arena franca, lo que implica un incremento de la proporción de arena a profundidad. La mayor presencia de arcilla en C1 y de limo en C2 puede influir en las propiedades hidráulicas del suelo. Según Hillel (2004), estos cambios pueden disminuir la retención de agua y nutrientes, limitando la productividad del suelo.

La Calicata 5 (C5), muestra un aumento de Da de 1,06 g/cm³ en superficie a 1,56 g/cm³ en las capas inferiores. Esta evolución se acompaña de un cambio textural desde franco hacia arena franca, con mayor contenido de arena en profundidad. Este comportamiento indica una menor capacidad de retención hídrica y nutrimental, lo cual exige la implementación de prácticas como la incorporación de materia orgánica (Brady & Weil, 2008; Hillel, 2004).

En la Calicata 6 (C6), la densidad aparente también incrementa con la profundidad, siendo atribuida a la compactación generada por tráfico de maquinaria y prácticas agrícolas (Dexter et al., 2008; Soane et al., 2010). La reducción en el contenido de arcilla y el

aumento de arena en capas profundas refuerzan esta interpretación, ya que los suelos arenosos tienden a compactarse con mayor facilidad (Rawls et al., 2003).

La Calicata 7 (C7) evidencia una disminución de la Da desde 1,52 g/cm³ en C1 hasta 1,28 g/cm³ en C3, con una textura que evoluciona de franco arenosa a franco arcilloso arenosa. El horizonte superficial (Hz A) presenta la menor Da (1,00 g/cm³), lo cual indica buena porosidad y estructura, favoreciendo el desarrollo radicular. Sin embargo, la alta proporción de arena en Cp1 puede limitar la capacidad de retención de agua, fenómeno respaldado por Hillel (2004).

En síntesis, los resultados muestran que las calicatas 1, 5, 6 y 7 presentan una textura franca con densidades entre 1,00 y 1,25 g/cm³, indicando suelos sueltos, porosos y con alta capacidad de retención hídrica, recomendables para cultivos exigentes como cacao, cítricos y hortalizas. Las calicatas 2 y 3, con textura franco-arenosa y Da entre 1,22 y 1,25 g/cm³, reflejan fertilidad física media, apta para cultivos de menor exigencia. Por otro lado, la calicata 4, aunque con Da aceptable, posee alta proporción de arena, lo cual limita su fertilidad, siendo recomendable para gramíneas rústicas o programas de recuperación de suelos.

Finalmente, el comportamiento observado a lo largo de los perfiles concuerda con lo señalado por Brady y Weil (2008), quienes establecen que la densidad aparente tiende a incrementarse con la profundidad debido a la disminución de materia orgánica y al aumento de fracciones minerales densas. La variabilidad horizontal entre calicatas también refleja el impacto del manejo agronómico y las condiciones naturales, factores que deben ser considerados en la planificación de estrategias sostenibles de uso y conservación de suelos.

El análisis de las propiedades físicas del suelo, centrado en la densidad aparente (Da) y la textura, evidencia patrones consistentes a lo largo de las siete calicatas estudiadas. Se observa una tendencia general al incremento de la Da con la profundidad del perfil, resultado que concuerda con lo indicado por Brady y Weil (2008), quienes afirman que los horizontes superficiales tienden a ser más sueltos y menos compactos debido a una mayor presencia de materia orgánica y actividad biológica, mientras que las capas subsuperficiales presentan mayor compactación por el peso de las capas superiores y la menor presencia de agregados estables.

Las calicatas 1, 5, 6 y 7 presentan valores de densidad aparente entre 1,00 y 1,25 g/cm³ en los horizontes superficiales, clasificados como suelos de estructura suelta y alta porosidad, condiciones favorables para la aireación y el desarrollo radicular. En contraste, en las capas más profundas (por ejemplo, C2 y C3), los valores de Da alcanzan hasta 1,61 g/cm³, lo que indica mayor compactación y posible restricción al crecimiento radicular, infiltración y movimiento de agua.

En cuanto a la clase textural, se identifican variaciones a lo largo del perfil que reflejan transiciones desde texturas más arenosas en superficie (franco arenoso) hacia texturas con mayor contenido de arcilla en profundidad (franco arcilloso arenoso). Esta distribución está influenciada por procesos pedogenéticos como la lixiviación, acumulación de arcillas, y meteorización diferencial, tal como lo describen Buol et al. (2003) y Hillel (2004). Las calicatas 3, 4 y 7 muestran esta transición con claridad, donde la capa superficial exhibe una textura más ligera y suelta, mientras que las capas inferiores presentan una mayor proporción de arcilla, afectando la estructura, permeabilidad y retención de agua.

Estas variaciones en densidad aparente y textura tienen implicaciones directas sobre la fertilidad física del suelo. Los suelos con texturas francas y densidades bajas favorecen la retención de agua y el intercambio gaseoso, mientras que suelos con mayor compactación y texturas más finas pueden limitar estos procesos, especialmente en condiciones de manejo intensivo o en presencia de maquinaria pesada. La interpretación conjunta de estos resultados permite clasificar los suelos evaluados en niveles de fertilidad física alta (calicatas 1, 5, 6 y 7), media (calicatas 2 y 3) y baja (calicata 4), proporcionando información valiosa para la selección de cultivos, diseño de sistemas de manejo y prácticas de conservación del suelo

4.2. Parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible, K disponible, Ca, Mg, K, Na, Al, H, bases cambiables, acides cambiabile y saturación de aluminio) en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía

Los resultados del análisis químico del suelo de las siete calicatas del fundo FUNAS-I (Tabla 5) muestran variaciones significativas en pH, materia orgánica (MO), nutrientes esenciales (N, P, K), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), a lo largo de los diferentes horizontes del perfil edáfico.

En la Calicata 1 (C1), el horizonte A presenta un pH más ácido (5,42) respecto al horizonte AC (5,24), además de una mayor concentración de MO (2,96 %) y de nutrientes disponibles como P (12,94 ppm) y K (105,95 ppm), lo que refleja una mayor fertilidad superficial, posiblemente asociada a una mayor actividad biológica y acumulación de residuos vegetales. La CIC también es superior en el Hz A, lo que favorece la retención de nutrientes. La comparación entre C1 y C2 revela un aumento del pH hacia la profundidad (de 6,73 a 7,11), pero con reducción en MO y nutrientes, indicando menor fertilidad en capas profundas.

Tabla 5. Relación de las características química de las 7 calicatas del FUNAS-I, Facultad de Agronomía - UNAS

Calicatas	Hz/Cap.	pH 1:1	M.O %	N	P	K	Cmol(+)/kg							BC	AC %	SAI
							CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H			
C1	Hz A	5,42	2,96	0,15	12,94	105,95	8,37	6.70	0,82	0,13	0,11	0,50	0,11	93,00	7,00	6,00
	Hz AC	5,24	1,25	0,06	6,53	50,48	6,87	5.40	0,63	0,08	0,03	0,70	0,04	89,00	11,00	10,00
	Ca1	6,73	0,90	0,04	9,07	59,40	3,50	2.79	0,53	0,11	0,08	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Ca2	7,11	0,81	0,04	8,04	92,46	2,52	1.81	0,51	0,11	0,09	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C2	Hz A	6,02	3,22	0,16	9,07	95,46	9,45	7.52	1,69	0,16	0,08	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Hz AC	6,31	1,88	0,09	4,64	84,46	7,23	5.83	1,24	0,11	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	7,19	1,25	0,06	10,68	80,96	7,74	6.22	1,38	0,12	0,03	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C3	Hz O	7,07	3,49	0,17	16,43	136,44	16,10	14.13	1,65	0,31	0,02	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Hz A	5,57	3,31	0,17	11,53	92,96	11,61	10.36	1,05	0,15	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	7,59	1,52	0,08	5,30	75,47	10,23	9.04	0,98	0,16	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C2	7,68	1,34	0,07	5,87	45,48	9,18	8.14	0,91	0,11	0,01	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C3	8,13	0,54	0,03	10,49	95,96	4,16	3.61	0,41	0,08	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C4	Hz O	5,90	3,85	0,19	20,59	103,95	9,72	7.82	1,60	0,27	0,03	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Hz A	7,50	2,15	0,11	15,87	69,97	7,36	5.58	1,66	0,11	0,01	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	7,47	0,81	0,04	14,93	46,48	4,99	4.27	0,63	0,08	0,02	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C2	7,84	0,45	0,02	10,30	50,48	3,54	2.95	0,46	0,10	0,02	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C3	8,28	0,36	0,02	12,28	84,96	2,47	2.01	0,33	0,09	0,04	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C5	Hz A	5,84	2,51	0,13	10,02	163,93	8,92	7.49	1,25	0,13	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Hz AC	6,10	1,88	0,09	3,79	86,96	6,48	5.54	0,79	0,09	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	6,60	1,07	0,05	9,07	142,44	5,23	4.41	0,65	0,11	0,07	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C2	7,22	0,36	0,02	6,81	77,47	2,76	2.30	0,37	0,06	0,03	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C6	Hz A	6,68	2,33	0,12	9,36	107,95	9,14	7.86	1,05	0,18	0,05	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	Hz AC	6,00	1,79	0,09	3,60	40,48	7,71	6.64	0,91	0,09	0,06	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	7,95	1,61	0,08	5,87	45,48	3,95	3.49	0,34	0,07	0,06	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C2	8,54	1,25	0,06	5,11	24,49	3,95	3.72	0,16	0,05	0,02	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C3	8,72	0,18	0,01	5,20	32,49	4,73	4.49	0,17	0,05	0,02	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
C7	Hz A	7,70	2,96	0,15	13,15	100,46	10,34	8.78	1,12	0,35	0,09	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C1	8,41	1,34	0,07	7,56	50,98	4,23	3.75	0,36	0,06	0,06	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C2	8,49	1,25	0,06	11,49	55,98	7,48	6.66	0,69	0,09	0,04	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
	C3	8,71	0,99	0,05	9,82	31,99	7,57	6.86	0,59	0,08	0,04	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00

Estos cambios confirman que la fertilidad del suelo decrece con la profundidad, como señalan Brady y Weil (2008) y Marschner (2012), debido a una menor actividad biológica y acumulación de MO.

En la Calicata 2 (C2), se observa un incremento progresivo del pH desde Hz A (6,02) hasta Cp1 (6,66), reflejando un ambiente ligeramente alcalino en profundidad. Paralelamente, la MO y el N disminuyen (de 3,22 % a 1,96 % y de 0,16 % a 0,05 %, respectivamente), lo que implica una reducción de la actividad biológica. Esta tendencia es consistente con la acumulación de bases en profundidad, tal como explican Buol et al. (2003) y Hinsinger et al. (2009). Las concentraciones de P y K también decrecen, mientras que la CIC, aunque variable, presenta valores intermedios. La ausencia de Al y H en todas las capas, junto con una saturación de bases del 100 %, indica condiciones favorables para la absorción de nutrientes, sin riesgo de toxicidad por acidez o aluminio.

La Calicata 3 (C3) muestra un comportamiento similar, con un pH que pasa de ácido (5,88) en Hz A, a neutro-alcalino (7,14) en la calicata C3. La MO y el N disminuyen notablemente en profundidad, y los valores de P y K se reducen, afectando la fertilidad. La CIC máxima se registra en Hz O (16,43), con cationes cambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) presentes en niveles adecuados, favoreciendo la nutrición vegetal. Estos datos concuerdan con Brady y Weil (2008) y Marschner (2011), quienes destacan el rol de la MO en la CIC y en la disponibilidad de nutrientes. La saturación de bases del 100 % y la ausencia de Al y H en todos los horizontes refuerzan la alta calidad química del suelo en esta calicata.

En la Calicata 4 (C4) se observa un aumento continuo del pH (de 5,90 en Hz O a 8,37 en C3), lo que podría afectar la disponibilidad de micronutrientes. La MO disminuye de 3,55 % a 2,15 %, acompañada de una reducción en los niveles de N, P y K. La CIC también decrece hacia la profundidad (de 14,38 a 7,36 meq/100g), lo que indica una reducida capacidad de retención de nutrientes. Según Brady y Weil (2008), esta disminución puede estar asociada a la reducción de MO y de minerales activos. La presencia adecuada de Ca^{2+} y Mg^{2+} en superficie y su disminución en profundidad refuerzan la necesidad de ajustes en la fertilización. La saturación de bases del 100 % es positiva, pero se sugiere monitorear la disponibilidad de micronutrientes.

En la Calicata 5 (C5), el pH asciende ligeramente de 6,61 a 6,94 con la profundidad, mientras que la MO disminuye de 3,03 % a 2,36 %, y el P disponible de 10,81 ppm a 7,95 ppm, lo que evidencia una disminución de fertilidad. La CIC sigue la misma tendencia descendente (de 12,14 a 10,38), y los cationes cambiables se reducen, especialmente Ca^{2+} y K^+ . Estos datos son consistentes con lo planteado por Barrow (2018), quien señala que

la disponibilidad de nutrientes está condicionada por el contenido de MO y la CIC. La saturación de bases del 100 % en todas las capas y la ausencia de Al y H indican condiciones químicas adecuadas.

En la Calicata 6 (C6), el pH aumenta con la profundidad (de 6,75 a 7,08), mientras que la MO se reduce de 2,53 % a 1,56 %, y el N de 0,11 % a 0,05 %, reflejando un descenso en la actividad biológica. El P y K disponibles también disminuyen, lo que podría comprometer la nutrición vegetal. La CIC se mantiene entre 8,71 y 10,66 meq/100g, con una disminución en los cationes cambiabiles a mayor profundidad. La presencia adecuada de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} , junto con la saturación de bases del 100 %, sugiere condiciones fácilmente manejables mediante prácticas agronómicas.

En la Calicata 7 (C7), se observa un incremento sostenido del pH desde 6,70 (Hz A) hasta 8,71 (C3), con una disminución paralela de la MO (de 3,70 % a 0,99 %) y el N (de 0,15 % a 0,05 %). La CIC disminuye progresivamente, de 14,50 a 7,57 meq/100g, lo que refleja una menor capacidad de retención catiónica en profundidad. Los valores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} también decrecen, y si bien la saturación de bases es del 100 %, se recomienda evaluar la disponibilidad efectiva de nutrientes en capas profundas.

De manera general, se identifican tres niveles de fertilidad química: alta en las calicatas 2, 3, 5 y 7 ($\text{MO} \geq 2,5$ %, $\text{P} > 90$ ppm, $\text{K} > 10$ ppm, $\text{CIC} > 9$ meq/100g), media en las calicatas 1 y 6 (MO : 2,3–2,9 %, P : 80–108 ppm, CIC : 8–9 meq/100g), y baja en la calicata 4 (MO : 2,15 %, P : 69,97 ppm, CIC : 7,36 meq/100g). Este diagnóstico permite orientar el uso y manejo del suelo: las calicatas de alta fertilidad son aptas para cultivos exigentes como cacao, ajíes y hortalizas; las de fertilidad media para maíz, plátano y yuca; y la de baja fertilidad para cultivos rústicos o programas de recuperación con materia orgánica y cobertura vegetal. Las condiciones químicas observadas concuerdan con lo planteado por Brady y Weil (2008), Marschner (2011), y Barrow (2018), quienes destacan el papel de la MO, el pH, la CIC y los cationes en la fertilidad del suelo y su manejo agronómico

El análisis de las propiedades químicas del suelo revela diferencias notables entre horizontes y calicatas, reflejando la influencia de factores como la actividad biológica, la descomposición de materia orgánica y los procesos de lixiviación. Uno de los patrones más consistentes observados es el aumento progresivo del pH con la profundidad del perfil. Las calicatas 1, 2, 3, 4 y 7 muestran este comportamiento, pasando de valores ácidos o ligeramente ácidos en superficie, hacia condiciones neutras o incluso alcalinas en capas profundas. Esta tendencia, según Brady y Weil (2008), está relacionada con la acumulación de bases cambiabiles en profundidad y la reducción de la MO.

En todas las calicatas se observa una disminución de la materia orgánica (MO) y del nitrógeno (N) a mayor profundidad, lo que indica una menor actividad biológica y escasa renovación de residuos orgánicos en las capas subsuperficiales. Esta reducción afecta directamente la fertilidad del suelo, ya que la MO mejora la estructura, la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónica (CIC), además de ser fuente de nutrientes esenciales (Nelson y Sommers, 1996; Brady y Weil, 2008).

Las concentraciones de fósforo (P) y potasio (K) disponibles también tienden a disminuir con la profundidad. Esta distribución es coherente con lo propuesto por Marschner (2011) y Syers et al. (2008), quienes explican que la movilidad limitada de estos elementos hace que se acumulen principalmente en los horizontes superficiales donde ocurre mayor actividad radicular y se concentran los residuos orgánicos. Esta situación implica que las capas superficiales poseen una mayor capacidad para soportar cultivos exigentes, mientras que las capas profundas requieren enmiendas específicas para suplir la deficiencia de estos nutrientes.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónica (CIC), se registran valores más altos en los horizontes superficiales (especialmente en las calicatas 2, 3, 5 y 7), lo cual está vinculado al mayor contenido de MO. Esta relación ha sido ampliamente documentada por Brady y Weil (2008), quienes señalan que la CIC aumenta con el contenido de materia orgánica activa y con la presencia de minerales arcillosos tipo 2:1. La reducción de CIC en las capas más profundas puede limitar la retención de cationes esenciales y afectar la fertilidad química del suelo.

Respecto a los cationes intercambiables, se observa una presencia adecuada de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en la mayoría de los perfiles, aunque con tendencia decreciente con la profundidad. El potasio (K^+), si bien se presenta en niveles relativamente adecuados en la superficie, disminuye notoriamente en capas inferiores. El sodio (Na^+) se mantiene en valores bajos, lo cual es favorable para evitar procesos de sodificación que puedan deteriorar la estructura del suelo (Brady y Weil, 2008).

La saturación de bases alcanza el 100 % en todos los horizontes y calicatas, lo que implica que todos los sitios de intercambio están ocupados por cationes básicos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , sin presencia significativa de acidez intercambiable ni aluminio tóxico. Esta condición es altamente favorable para el crecimiento de las plantas, ya que elimina el riesgo de toxicidad por Al^{3+} y mejora la disponibilidad de nutrientes (Marschner, 2011).

La clasificación general de la fertilidad química basada en MO, P, K y CIC permite agrupar las calicatas en tres niveles. Las calicatas 2, 3, 5 y 7 presentan fertilidad alta, aptas para cultivos exigentes como cacao, hortalizas y ajíes. Las calicatas 1 y 6 presentan

fertilidad media, recomendadas para cultivos intermedios como maíz, yuca y plátano. Finalmente, la calicata 4 muestra menor contenido de MO y CIC, clasificándose con baja fertilidad, adecuada para cultivos rústicos o programas de recuperación con abonos verdes y enmiendas orgánicas. Estos resultados son consistentes con los criterios propuestos por Brady y Weil (2008), Barrow (2018) y Marschner (2011), quienes destacan la importancia de la integración de las propiedades químicas del suelo para una gestión agronómica eficaz y sostenible

4.3. Mapas de distribución espacial de los parámetros químicos del suelo (pH, MO, N, P disponible y K disponible) para proponer estrategias de manejo sostenible en diferentes áreas del fundo de la Facultad de Agronomía

El análisis del pH del suelo revela una variabilidad significativa en las condiciones químicas de la zona estudiada, con valores que oscilan entre 5,42 y 7,70 en las siete calicatas evaluadas (Figura 7). La categoría predominante corresponde a suelos ligeramente ácidos y neutros, lo que representa una condición favorable para la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de cultivos, la mayor extensión de suelo corresponde a suelos ligeramente ácidos (43,0 % con 4,97 ha) y neutros (29,0 % con 3,40 ha, pH entre 6,5 y 7,0), lo que indica condiciones óptimas para la absorción de nutrientes esenciales (Brady y Weil, 2008). Las calicatas presentan diferencias en sus valores de pH, lo que sugiere variaciones en la composición mineralógica, la acumulación de bases y los procesos de lixiviación.

Las calicatas C-1 (5,42), C-4 (5,90) y C-5 (5,84) presentan suelos ácidos, lo que puede afectar la absorción de fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg), además de incrementar la solubilidad del aluminio (Al), que en concentraciones elevadas puede ser tóxico para las raíces (Weil, 2008). En estos casos, es recomendable aplicar enmiendas calcáreas, como cal dolomítica, para elevar el pH y mejorar la fertilidad del suelo.

Por otro lado, las calicatas C-2 (6,02) y C-6 (6,68) presentan pH ligeramente ácido, lo cual es adecuado para la mayoría de los cultivos, ya que favorece la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes esenciales. Sin embargo, estos valores deben monitorearse para evitar que disminuyan y se acerquen a niveles de acidez que puedan afectar la fertilidad del suelo (Alloway, 2013).

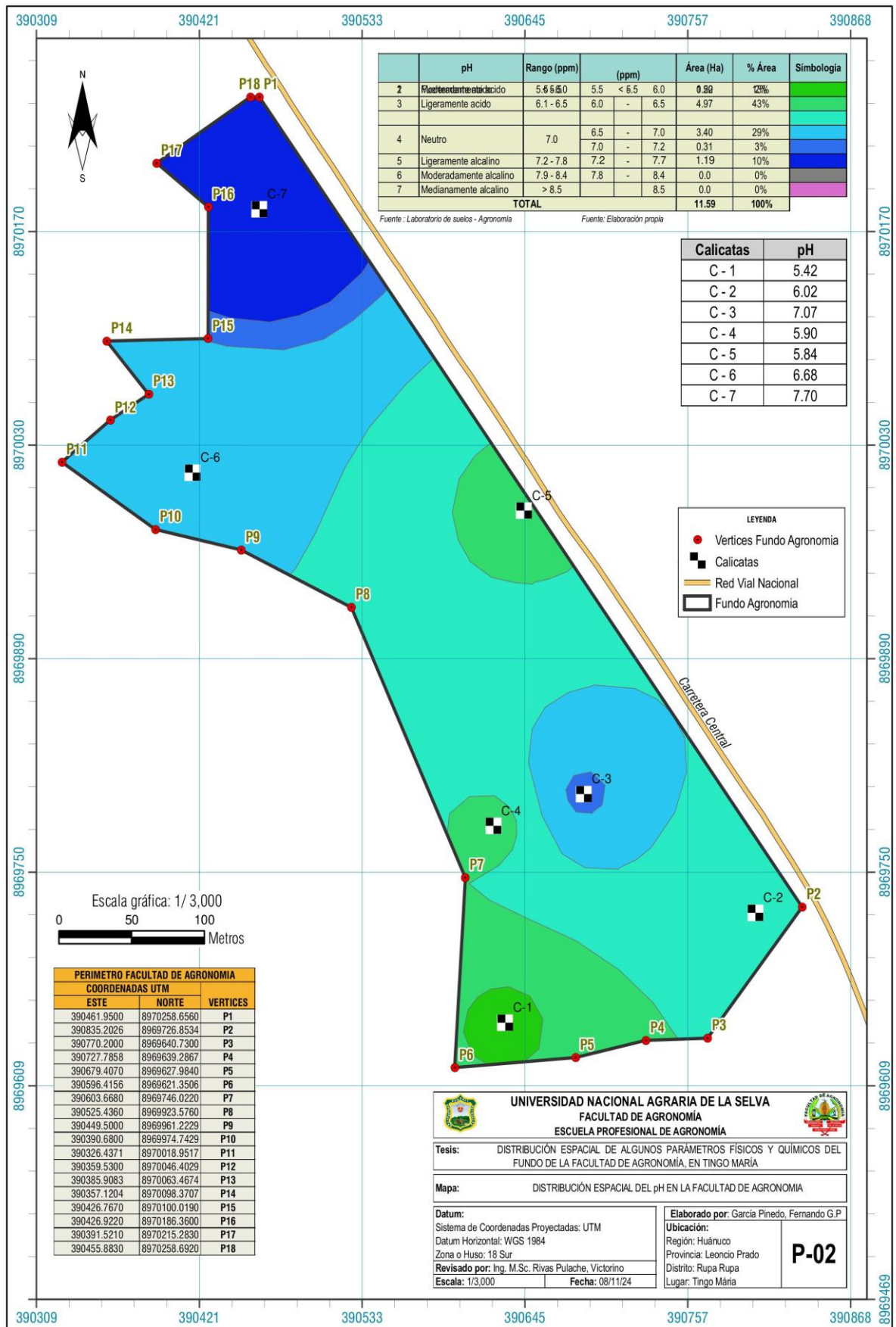


Figura 7. Distribución espacial del pH superficial del fondo de la Facultad de Agronomía

Las calicatas C-3 (7,07) y C-7 (7,70) presentan suelos neutros a ligeramente alcalinos, lo que favorece la absorción de nutrientes en la mayoría de los cultivos. No obstante, en suelos con tendencia a la alcalinidad, la solubilidad de algunos micronutrientes, como hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), puede verse reducida, afectando su disponibilidad para las plantas (Brady y Weil, 2008; Alloway, 2013).

El pH neutro y ligeramente ácido abarca la mayor extensión del área de estudio (72,0 % del total evaluado), lo que confirma su aptitud para la agricultura, los suelos moderadamente ácidos (15,0 %), aunque presentes en menor proporción, requieren una gestión adecuada para evitar deficiencias nutricionales, los suelos ligeramente alcalinos (10,0 %), si bien no representan un problema crítico, deben considerarse en la planificación de cultivos y estrategias de fertilización, ya que un aumento en la alcalinidad puede reducir la disponibilidad de algunos nutrientes clave. Estos resultados muestran las estrategias de manejo agrícola en función del pH del suelo, la aplicación de cal agrícola o dolomítica puede mejorar la fertilidad, mientras que, en suelos neutros o ligeramente alcalinos, el uso de fertilizantes ricos en micronutrientes puede prevenir deficiencias nutricionales (Brady y Weil, 2008). La distribución del pH en el área estudiada es coherente con la literatura, que indica que la alcalinidad del suelo influye en la solubilidad de fosfatos y micronutrientes, mientras que la acidez afecta la disponibilidad de calcio y magnesio (Alloway, 2013).

La Figura 8, muestra que el análisis de materia orgánica (MO) en el suelo indica que la mayor parte del área evaluada presenta niveles alto (2 - 4 %), lo que sugiere condiciones de fertilidad adecuadas para la actividad biológica y la disponibilidad de nutrientes esenciales. No se registraron suelos con niveles bajos de MO (<2 %), ni suelos con contenido alto de MO (>4 %), lo que indica una distribución equilibrada sin extremos que afecten significativamente la producción agrícola. Dentro del rango medio, la mayor proporción del suelo se encuentra en los intervalos de 2,60 - 2,80 % (21,0 % del área) y 3,30 - 3,50 % (17,0 % del área), lo que significa que casi la mitad del terreno posee niveles adecuados de MO para el desarrollo de cultivos. Sin embargo, existen zonas con valores más bajos dentro de este rango, como 2,33 - 2,60 % (15,0 % del área) y 2,80 - 2,90 % (7,0 % del área), que podrían beneficiarse de la incorporación de enmiendas orgánicas para mejorar la calidad del suelo. A medida que aumenta la concentración de MO, la superficie cubierta disminuye, con un 16,0 % del área en el rango de 2,90 - 3,10 %, un 17,0 % en el intervalo de 3,10 - 3,30 % y otro 17,0 % en el rango de 3,30 - 3,50 %. Finalmente, la fracción más alta del rango medio (3,50 - 3,85 %) representa solo el 7,0 % del área, lo que sugiere que suelos con mayor contenido de MO son menos frecuentes.

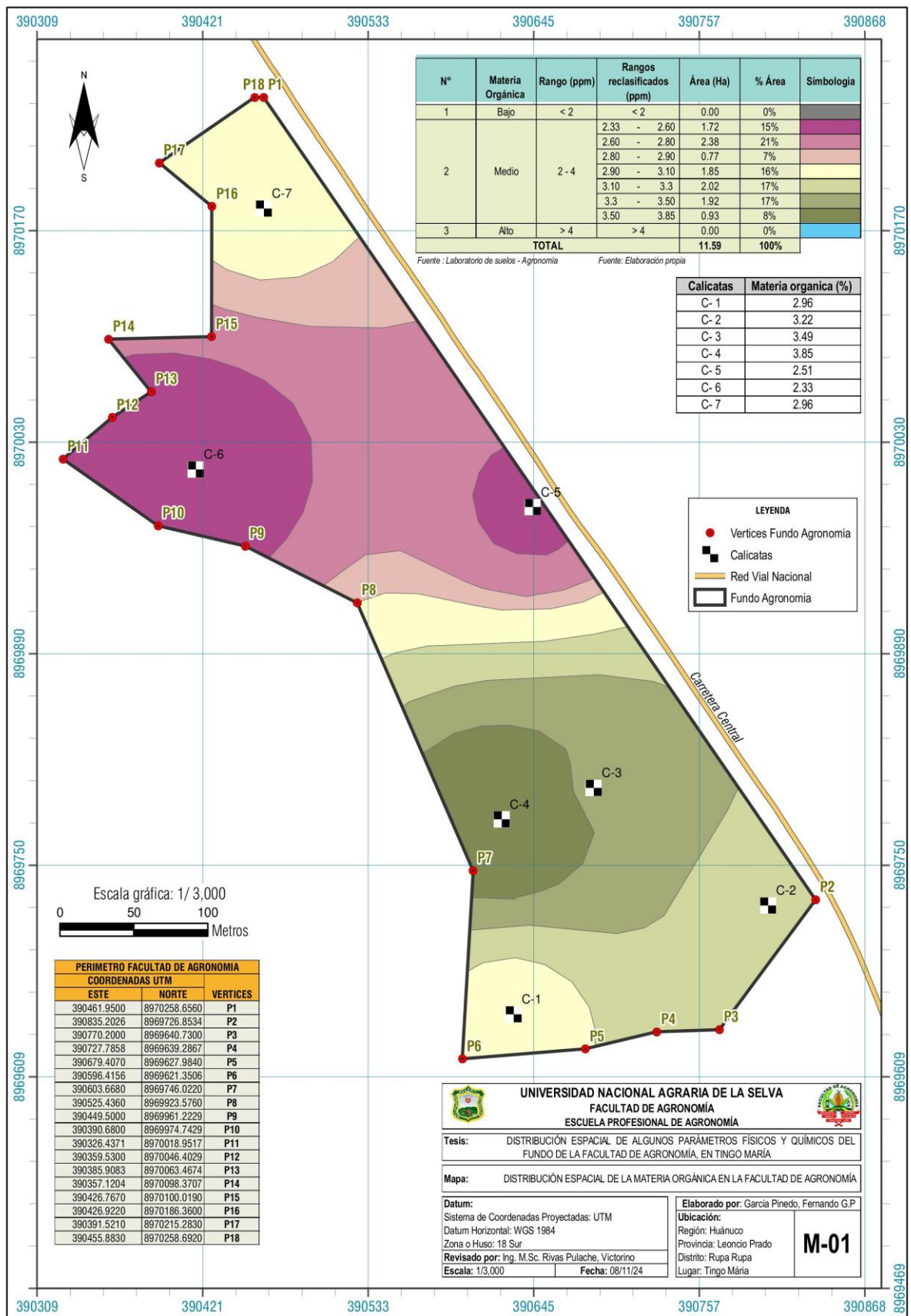


Figura 8. Distribución espacial de la materia orgánica superficial del fundo en la Facultad de Agronomía

Estos resultados reflejan condiciones favorables para la producción agrícola, ya que la MO es crucial para la retención de humedad, la estabilidad estructural y la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) (Brady y Weil, 2008). No obstante, en sectores con valores más bajos dentro del rango medio, se recomienda el uso de abonos orgánicos, cultivos de cobertura y prácticas de conservación de suelo para mejorar la fertilidad y evitar su degradación a largo plazo. El análisis de las siete calicatas muestra una variación en los niveles de materia orgánica, que van de 2,33 % a 3,85 %, lo que refleja una fertilidad moderada en el área de estudio. Los valores más altos se registran en C-4 (3,85 %), C-3 (3,49 %) y C-2 (3,22 %), lo que sugiere una mejor disponibilidad de nutrientes y una estructura del suelo más estable en estos sectores. Estas condiciones favorecen la actividad biológica, mejoran la capacidad de retención de agua y contribuyen a mantener la fertilidad, aspectos esenciales para el buen desarrollo de los cultivos.

Las calicatas C6 (2,33 %), C5 (2,51 %) y C1 (2,96 %) registran los niveles más bajos de materia orgánica, lo que limita la disponibilidad de nutrientes y reduce tanto la capacidad de retención de agua como la mejora estructural del suelo. Estas áreas podrían fortalecerse con la incorporación de enmiendas orgánicas, como compost o abonos verdes, que contribuirían a incrementar el contenido de materia orgánica y, con ello, la fertilidad a largo plazo.

Las calicatas C7 (2,96 %) y C1 (2,96 %) muestran valores intermedios de materia orgánica, aunque cercanos al límite inferior del rango medio, lo que señala la importancia de un monitoreo constante para evitar mayores pérdidas y asegurar la sostenibilidad del suelo. La materia orgánica cumple un papel esencial en los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan la productividad agrícola, ya que durante su descomposición libera nutrientes como nitrógeno, fósforo, azufre y diversos micronutrientes que son aprovechados por los cultivos (Lehmann et al., 2020). Asimismo, mejora la capacidad de retención de agua, lo cual resulta clave en periodos de sequía o en sistemas que demandan un suministro estable de humedad, y contribuye a la estabilidad de la estructura del suelo, favoreciendo la aireación y el desarrollo radicular (Brady y Weil, 2008). También sirve como fuente de alimento para los microorganismos, mejorando la descomposición de residuos, la disponibilidad de nutrientes y la supresión de patógenos (Lehmann et al., 2020).

Dado que no se registraron niveles bajos de MO, pero sí valores cercanos al límite inferior del rango medio en algunas calicatas, es fundamental implementar estrategias de manejo agrícola sostenible para conservar y mejorar estos niveles. Se recomienda la adición de compost, el uso de cultivos de cobertura, la reducción de la labranza y la rotación de cultivos

para fomentar la acumulación de MO y mejorar la calidad del suelo a largo plazo (Brady y Weil, 2008; Lehmann et al., 2020).

Los suelos evaluados tienen niveles adecuados de MO, aunque con variaciones entre las calicatas que requieren estrategias de manejo diferenciadas. La mayor parte del suelo se encuentra dentro del rango medio, lo que es positivo para la agricultura, pero en algunas zonas con valores más bajos es necesario reforzar las prácticas de conservación para evitar la degradación del suelo y mejorar su estabilidad. La aplicación de abonos orgánicos y la implementación de técnicas de manejo sostenible serán clave para mantener la fertilidad del suelo y garantizar su productividad a largo plazo.

En la Figura 9 se observa que la mayoría del área evaluada presenta contenidos medios de nitrógeno total, con valores entre 0,10 y 0,20 %, lo que refleja una disponibilidad moderada de este nutriente esencial para el desarrollo de los cultivos. No se registraron suelos con niveles bajos de nitrógeno (<0,10 %), lo que es positivo desde una perspectiva agronómica, ya que evita deficiencias severas que podrían afectar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la distribución del nitrógeno dentro del rango medio es heterogénea, lo que sugiere la necesidad de ajustes en la fertilización y estrategias de manejo adecuadas para optimizar su disponibilidad en el suelo.

El análisis muestra que el 26 % del área presenta valores de 0,17 - 0,18 % de N, lo que representa la mayor extensión con contenido moderado de este nutriente. Le siguen los rangos 0,13 - 0,14 % (21 % del área) y 0,14 - 0,15 % (20 % del área), indicando que casi la mitad del suelo evaluado se encuentra en estos niveles intermedios. En menor proporción, los rangos 0,15 - 0,16 % (8 %), 0,16 - 0,17 % (11 %) y 0,19 - 0,20 % (4 %) representan sectores con mayor acumulación de nitrógeno dentro del rango medio. Por otro lado, los valores más bajos dentro del rango medio corresponden a las zonas con 0,10 - 0,13 % de N (10 % del área), lo que podría indicar la necesidad de un monitoreo continuo y la aplicación de fertilizantes nitrogenados para evitar deficiencias que afecten el rendimiento de los cultivos.

El contenido de nitrógeno total en las siete calicatas varía entre 0,12 % y 0,19 %, confirmando una disponibilidad moderada de este nutriente. Las calicatas con mayor concentración de N son C4 (0,19 %), C3 (0,17 %) y C2 (0,16 %), lo que sugiere una mejor disponibilidad de nitrógeno y condiciones favorables para el crecimiento vegetal en estos sectores. Por el contrario, las calicatas con menor contenido de N son C6 (0,12 %), C5 (0,13 %) y C1 (0,15 %), lo que podría limitar la absorción de este nutriente y afectar la productividad de los cultivos.

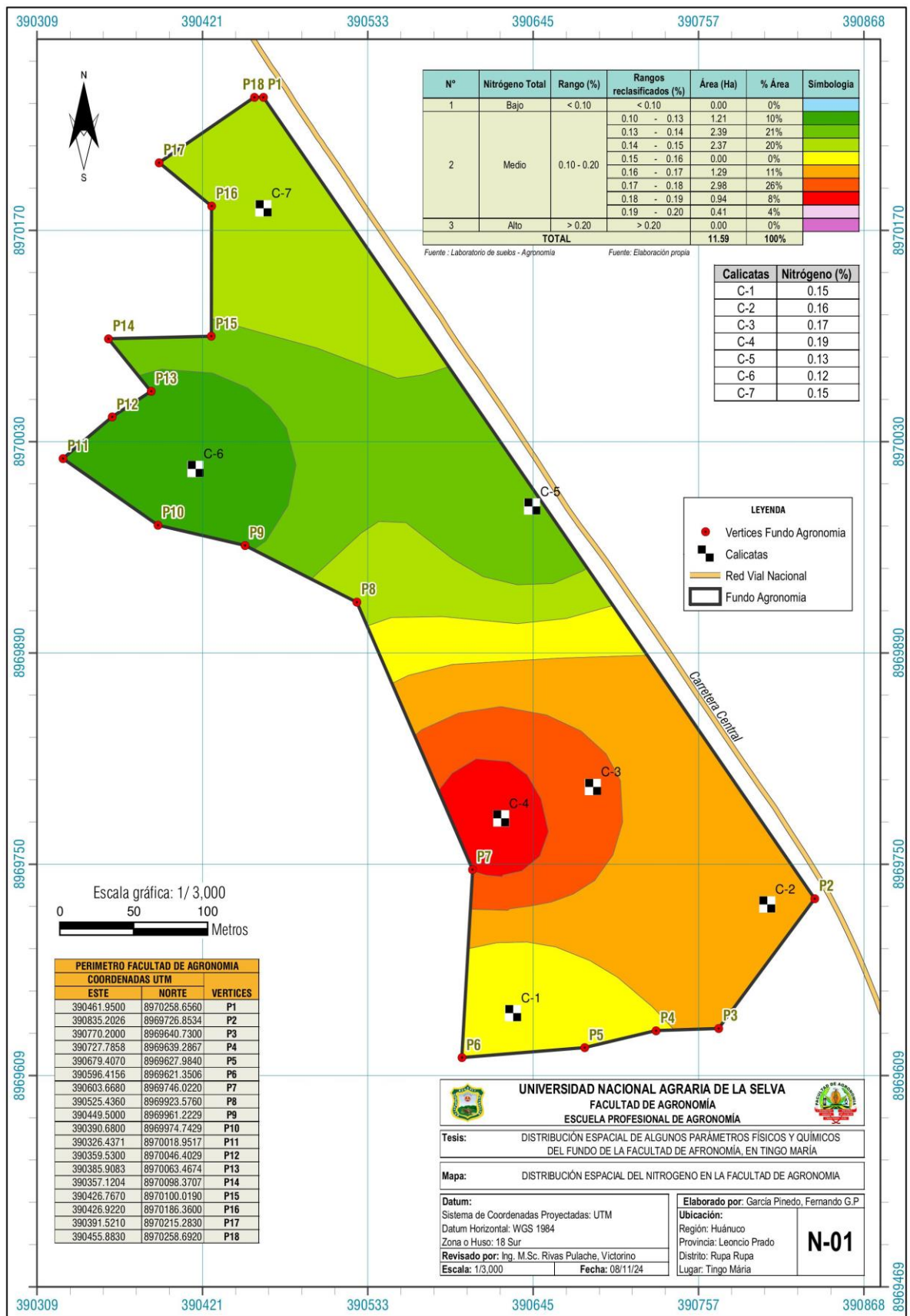


Figura 9. Distribución espacial del nitrógeno superficial del fondo de la Facultad de Agronomía

Estos sectores podrían beneficiarse de la aplicación de fertilizantes nitrogenados y la incorporación de materia orgánica, lo que contribuiría a mejorar la fertilidad del suelo y la estabilidad estructural a largo plazo.

Por otro lado, los valores más bajos dentro del rango medio corresponden a las zonas con 0,10 - 0,13 % de N (10 % del área), lo que podría indicar la necesidad de un monitoreo continuo y la aplicación de fertilizantes nitrogenados para evitar deficiencias que afecten el rendimiento de los cultivos.

El contenido de nitrógeno total en las siete calicatas varía entre 0,12 % y 0,19 %, confirmando una disponibilidad moderada de este nutriente. Las calicatas con mayor concentración de N son C4 (0,19 %), C3 (0,17 %) y C2 (0,16 %), lo que sugiere una mejor disponibilidad de nitrógeno y condiciones favorables para el crecimiento vegetal en estos sectores. Por el contrario, las calicatas con menor contenido de N son C6 (0,12 %), C5 (0,13 %) y C1 (0,15 %), lo que podría limitar la absorción de este nutriente y afectar la productividad de los cultivos. Estos sectores podrían beneficiarse de la aplicación de fertilizantes nitrogenados y la incorporación de materia orgánica, lo que contribuiría a mejorar la fertilidad del suelo y la estabilidad estructural a largo plazo.

Las calicatas C7 (0,15 %) y C1 (0,15 %) muestran valores intermedios de nitrógeno, lo que señala una disponibilidad moderada en estas zonas y resalta la importancia de un monitoreo constante para evitar su disminución y mantener la fertilidad del suelo. El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas porque forma parte de proteínas, enzimas y clorofila (Brady y Weil, 2008), y su disponibilidad depende en gran medida de la mineralización de la materia orgánica y de la actividad microbiana. Un manejo adecuado resulta indispensable para sostener la productividad agrícola, ya que cuando la oferta de nitrógeno es baja se limita la síntesis de compuestos vitales para las plantas (Hirel et al., 2007), lo que puede reflejarse en síntomas de deficiencia como amarillamiento de las hojas, menor crecimiento y reducción de la biomasa (Marschner, 2012). La presencia de valores cercanos al límite inferior en algunas calicatas sugiere la necesidad de estrategias de manejo agronómico para evitar deficiencias y mejorar la eficiencia en la absorción de nitrógeno.

Los resultados indican que el suelo evaluado presenta niveles moderados de nitrógeno en todas las calicatas, lo que es favorable para la producción agrícola. Sin embargo, la heterogeneidad en su distribución sugiere la necesidad de estrategias de manejo diferenciadas para optimizar su disponibilidad. La aplicación de fertilizantes nitrogenados, el uso de cultivos fijadores de nitrógeno y la incorporación de materia orgánica permitirá mantener niveles adecuados de este nutriente y mejorar la productividad del suelo a largo plazo. La literatura

científica respalda la importancia de un manejo eficiente del nitrógeno para evitar pérdidas por lixiviación, mejorar la fertilidad del suelo y garantizar un crecimiento óptimo de los cultivos (Brady y Weil, 2008; Lehmann et al., 2020). Implementar estrategias basadas en la conservación del nitrógeno y su reciclaje natural contribuirá a la sostenibilidad agrícola y a la mejora de la productividad en la región estudiada.

En la Figura 10, el análisis del fósforo disponible (P) en el suelo indica que la mayor parte del área evaluada presenta niveles medios (7 - 14 ppm), abarcando el 86 % de la superficie total, lo que sugiere una disponibilidad moderada de este nutriente esencial para el crecimiento de los cultivos. Dentro de este rango, los sectores con 10 - 12 ppm (33 %) y 12 - 14 ppm (30 %) representan la mayor proporción del suelo, mientras que los valores entre 9 - 10 ppm (9 %) y 14 - 16 ppm (14 %) muestran ligeras variaciones. No se registraron suelos con niveles bajos de fósforo (<7 ppm), lo que evita deficiencias severas en la absorción de este nutriente. En cuanto a los niveles altos de fósforo (>14 ppm), estos representan el 15 % del área, con sectores distribuidos en los rangos de 16 - 18 ppm (10 %), 18 - 20 ppm (4 %) y >20 ppm (1 %), lo que indica una acumulación localizada de fósforo. Dado que este nutriente es fundamental para el desarrollo radicular y la absorción de nitrógeno y potasio, se recomienda un manejo equilibrado de la fertilización para evitar bloqueos en su asimilación o pérdidas por fijación en el suelo (Havlin et al., 2014).

El contenido de P en las siete calicatas varía entre 9,07 ppm y 20,59 ppm, reflejando una distribución heterogénea en el suelo. Las calicatas con mayor contenido de fósforo son C4 (20,59 ppm) y C3 (16,43 ppm), clasificadas en el rango alto (>14 ppm). Esto indica que estas áreas pueden tener suficiente fósforo para el crecimiento de los cultivos, pero su exceso puede generar fijación con calcio en suelos alcalinos o con hierro y aluminio en suelos ácidos, reduciendo su disponibilidad para las plantas (Richardson et al., 2009). Por otro lado, las calicatas C2 (9,07 ppm), C5 (10,02 ppm) y C6 (9,36 ppm) presentan los valores más bajos dentro del rango medio, lo que podría requerir ajustes en la fertilización para evitar deficiencias en la absorción del fósforo. En estas áreas, el uso de fuentes de fósforo solubles o enmiendas orgánicas ayudaría a mejorar su disponibilidad en el suelo. Las calicatas C1 (12,94 ppm) y C7 (13,15 ppm) presentan niveles moderadamente altos, lo que indica una buena disponibilidad de fósforo sin llegar a niveles excesivos. Esto sugiere que en estas zonas el fósforo puede ser aprovechado eficientemente por los cultivos sin riesgo de pérdidas significativas.

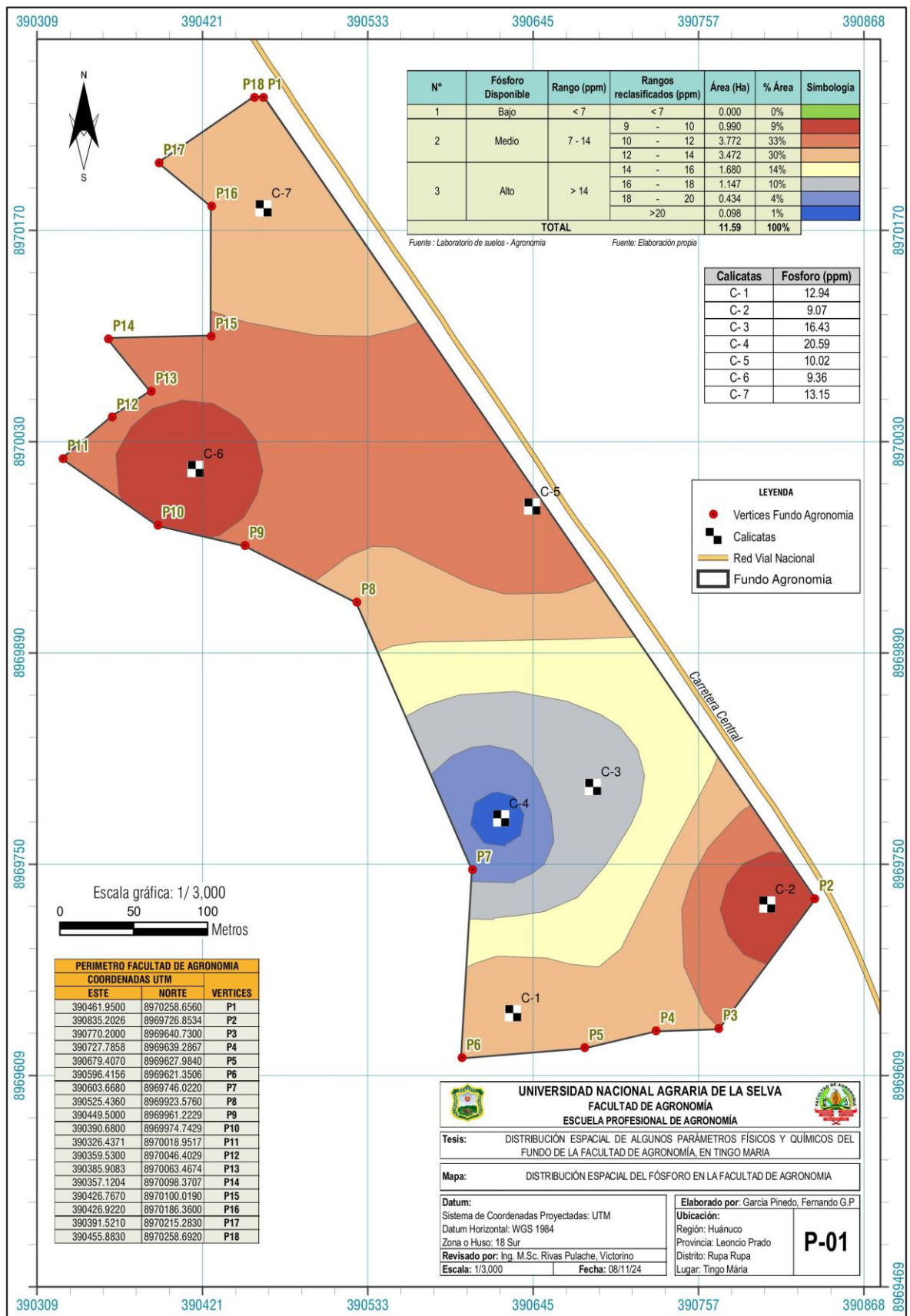


Figura 10. Distribución espacial del fósforo disponible superficial del fondo de la Facultad de Agronomía

El fósforo es un nutriente esencial para el desarrollo de las raíces, la fotosíntesis y la síntesis de ATP (Havlin et al., 2014). Su disponibilidad en el suelo está influenciada por la mineralización de la MO y las reacciones de fijación en los coloides del suelo. Según Marschner (2011), la deficiencia de fósforo puede limitar el crecimiento vegetativo y retrasar la floración y fructificación, reduciendo el rendimiento de los cultivos. Síntomas de deficiencia como hojas más oscuras, deformidades y raíces poco desarrolladas pueden presentarse en suelos con baja disponibilidad de fósforo (Marschner, 2011; Havlin et al., 2014). Además, la escasez de este nutriente afecta la eficiencia en la absorción de agua, lo que puede ser problemático en condiciones de sequía (Havlin et al., 2014). Por otro lado, un exceso de fósforo puede generar impactos ambientales negativos, como la escorrentía hacia cuerpos de agua, promoviendo la eutrofización (Richardson et al., 2009).

La evaluación del fósforo en el suelo indica que toda el área presenta niveles medios o altos, sin sectores con deficiencia severa. Sin embargo, la variabilidad en su distribución sugiere la necesidad de una fertilización diferenciada, optimizando la aplicación de fósforo en suelos con valores más bajos y evitando excesos en áreas con acumulación del nutriente. La adecuada gestión del fósforo es fundamental para maximizar la productividad agrícola y minimizar impactos ambientales negativos. Implementar estrategias como la fertilización controlada, el uso de materia orgánica y la rotación de cultivos permitirá garantizar un suministro eficiente de fósforo para los cultivos y mejorar la sostenibilidad del suelo en la región evaluada (Havlin et al., 2014; Richardson et al., 2009).

La Figura 11, muestra el análisis de potasio disponible (K) en el suelo indica que la mayor parte del área evaluada presenta niveles medios (100 - 240 ppm), abarcando el 98 % de la superficie total, lo que sugiere una disponibilidad moderada de este nutriente esencial para el crecimiento de los cultivos. El sector con 100 - 120 ppm representa el 58 % del área, lo que indica que más de la mitad del suelo tiene una concentración suficiente de potasio, aunque se recomienda monitorear su disponibilidad para evitar deficiencias a largo plazo. Dentro del rango medio, los sectores con 120 - 130 ppm (19 %), 130 - 140 ppm (11 %), 140 - 150 ppm (5 %) y 150 - 163,93 ppm (5 %) presentan variaciones en la concentración de potasio, lo que refleja una distribución heterogénea en el suelo. Sin embargo, se identificó un 3 % del área con niveles bajos de potasio (<100 ppm), lo que puede limitar la absorción de agua, la resistencia al estrés y el desarrollo general de los cultivos. En estas zonas, es recomendable aplicar fertilizantes potásicos, como sulfato de potasio o cloruro de potasio, para corregir deficiencias y optimizar la disponibilidad del nutriente.

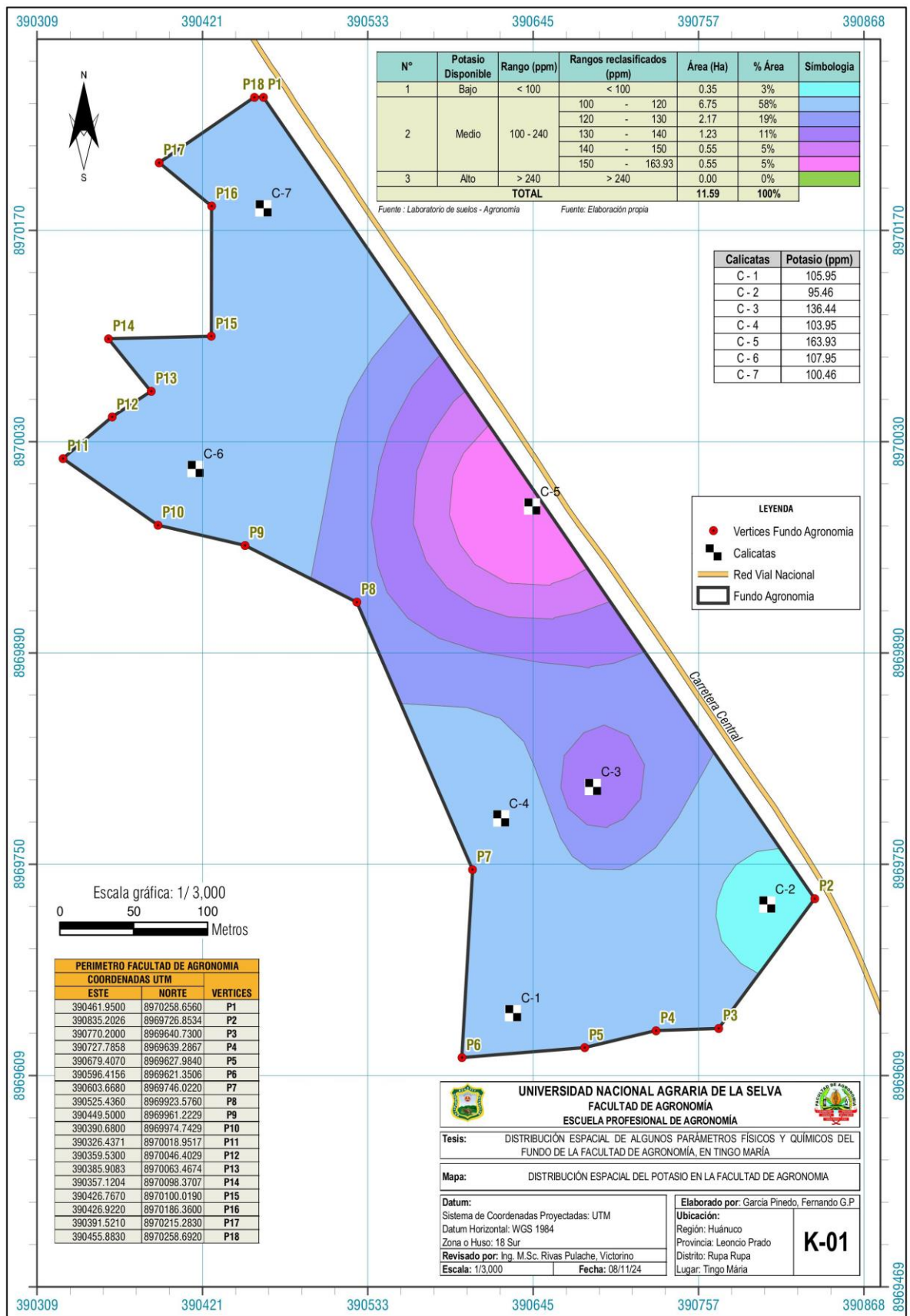


Figura 11. Distribución espacial del potasio disponible superficial del fondo de la Facultad de Agronomía

No se encontraron suelos con niveles altos de potasio (>240 ppm), lo que indica que no hay acumulación excesiva de este nutriente en la zona evaluada. Dado que el potasio es clave en la regulación osmótica, la activación enzimática y el transporte de nutrientes, es fundamental realizar un manejo eficiente de la fertilización para evitar pérdidas por lixiviación o deficiencias en el suelo (Marschner, 2012; Taiz et al., 2015).

El análisis de potasio en las siete calicatas muestra valores que varían entre 95,46 ppm y 163,93 ppm, evidenciando diferencias en la disponibilidad de este nutriente. Los niveles más altos se registran en C5 (163,93 ppm) y C3 (136,44 ppm), lo que indica una disponibilidad adecuada que reduce, al menos en el corto plazo, la necesidad de fertilización potásica, aunque su monitoreo es fundamental en suelos arenosos debido a la movilidad del elemento y al riesgo de pérdidas por lixiviación (Hinsinger et al., 2011). En contraste, C2 (95,46 ppm) presenta la menor concentración, ubicada en el rango bajo, lo que puede afectar la absorción de agua, la resistencia a enfermedades y la calidad de los frutos, por lo que se recomienda la aplicación de fuentes minerales de potasio junto con prácticas sostenibles como la rotación de cultivos y el uso de materia orgánica (White & Brown, 2010). Las calicatas C1 (105,95 ppm), C4 (103,95 ppm), C6 (107,95 ppm) y C7 (100,46 ppm) se sitúan ligeramente por encima del límite inferior del rango medio, lo que sugiere que, aunque no existe una deficiencia crítica, el manejo cuidadoso del nutriente puede ser determinante para sostener el rendimiento (Sparks, 2014).

El potasio es esencial para procesos fisiológicos como la elongación celular, la formación de tejidos y la fotosíntesis (Marschner, 2012), y su deficiencia se refleja en síntomas visibles como el secado de los bordes de las hojas, menor crecimiento y mayor vulnerabilidad al estrés hídrico y a las enfermedades (Taiz et al., 2015). La falta de este nutriente también limita la fotosíntesis, reduce la acumulación de biomasa y compromete la calidad de la cosecha, al afectar la concentración de azúcares y con ello el sabor y la textura de los frutos. Desde una perspectiva agronómica, la distribución heterogénea del potasio refuerza la necesidad de estrategias de fertilización diferenciadas, evitando aplicaciones innecesarias en suelos con niveles altos y corrigiendo deficiencias en los sectores más críticos; para ello, se recomienda el uso equilibrado de fertilizantes, la mejora en el manejo del suelo y la selección de cultivos más tolerantes a la carencia de K, medidas que resultan esenciales para optimizar el rendimiento y la calidad agrícola (Marschner, 2012; White & Brown, 2010; Taiz et al., 2015; Sparks, 2014).

Al comparar los resultados del mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del fundo de la Facultad de Agronomía de la UNAS con estudios realizados en otras regiones, se observa una distribución similar en los niveles de fertilidad del suelo (Figura 12).

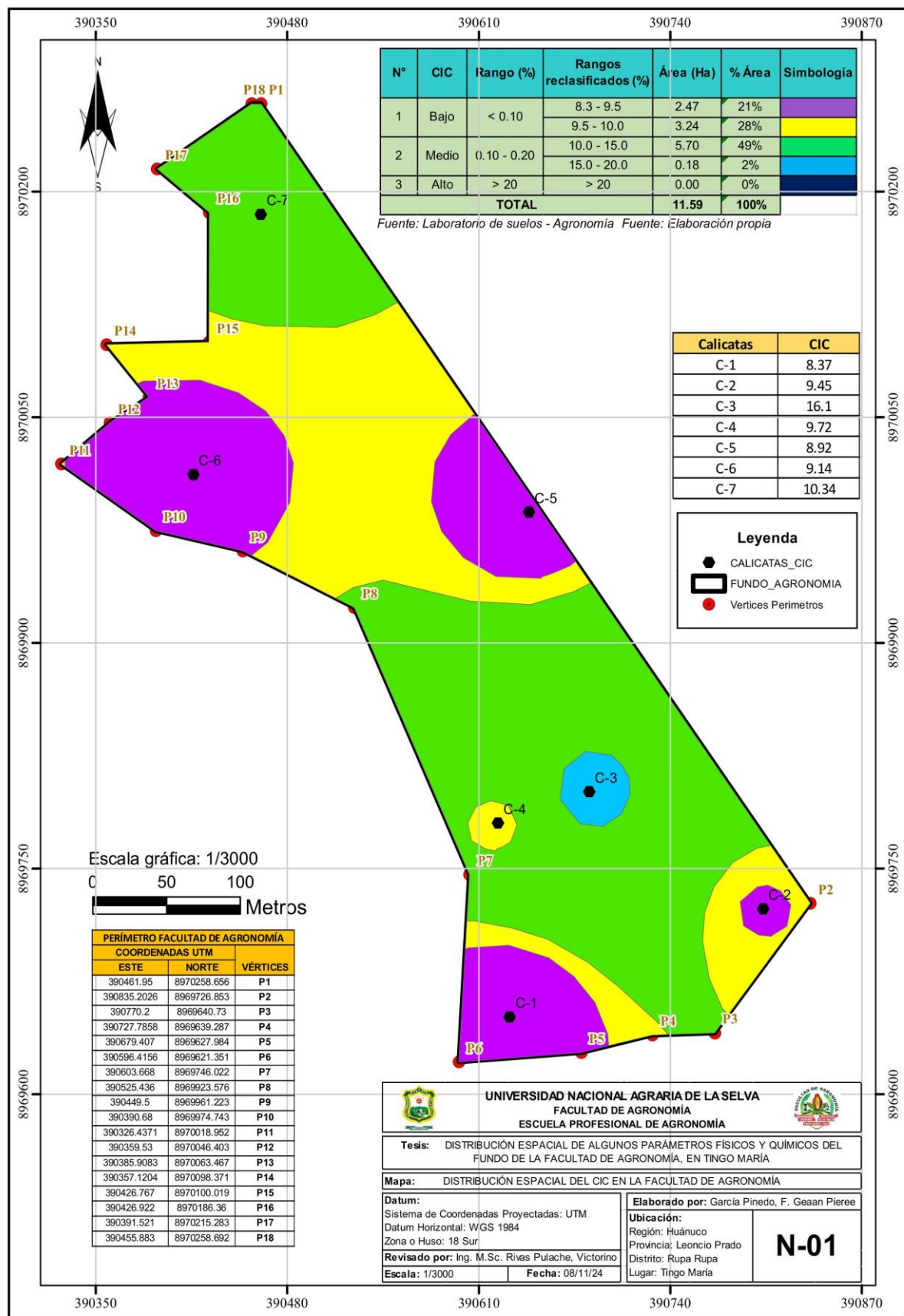


Figura 12. Distribución espacial de la capacidad de intercambio catiónico de la superficial del fundo de la Facultad de Agronomía

En el fundo, la mayor proporción del área evaluada presenta un nivel medio de CIC, abarcando el 49 % del total (5.70 ha), lo que indica que casi la mitad del terreno tiene una capacidad moderada para retener nutrientes. Le sigue el nivel bajo con un 28 % (3.24 ha), y finalmente el nivel alto representa solo el 21 % (2,47 ha) del área total.

Estos resultados son comparables con los obtenidos en un estudio realizado en Cotopaxi, Ecuador, donde se evaluó la CIC en suelos de diferentes sistemas productivos. En dicho estudio, se encontraron valores de CIC que oscilan entre 0.83 y 4.8 meq/100g, estimando estos suelos como pobres en capacidad de retención de nutrientes (Changoluisa, 2024). Asimismo, en investigaciones realizadas en Chiapas, México, se observó que suelos con baja CIC presentaban una fertilidad limitada, lo que afectaba la productividad de cultivos como el maíz (Cruz-Macías et al., 2020)

Estos estudios destacan la importancia de la materia orgánica y la textura del suelo en la determinación de la CIC. Suelos con mayor contenido de arcilla y materia orgánica tienden a tener una CIC más alta, lo que mejora la retención de nutrientes y la fertilidad del suelo (Abrego, 2012). Por lo tanto, en áreas con CIC baja, se recomienda la aplicación de enmiendas orgánicas, como compost o biochar, para mejorar la capacidad de intercambio catiónico y, en consecuencia, la productividad agrícola.

La relación entre el pH, MO, N, P y K es fundamental para comprender la disponibilidad de nutrientes para las plantas, el pH del suelo influye en la descomposición de la MO, siendo en suelos ácidos donde esta descomposición es más lenta, lo que puede llevar a acumulaciones de MO (Six et al., 2006), a su vez, la MO puede afectar el pH del suelo liberando ácidos orgánicos durante su descomposición (Brady y Weil, 2008), La disponibilidad de formas iónicas de N está relacionada con el pH, siendo más predominante el ion amonio en suelos ácidos y el ion nitrato en suelos alcalinos (Marschner, 2011), el pH también afecta la solubilidad del P, siendo este menos disponible en suelos ácidos y más en suelos alcalinos (Richardson et al., 2009), en cuanto al K, su disponibilidad se ve influenciada por el pH, con una mayor lixiviación en suelos ácidos y una fijación en suelos alcalinos (Brady y Weil, 2008), la absorción de K por las plantas también varía con el pH del suelo (Marschner, 2012), estos conceptos respaldados por estudios científicos subrayan la importancia de gestionar de manera eficiente estos factores en la agricultura para mejorar la productividad de los cultivos y la salud general del suelo.

El análisis de suelos realizado en el fundo FUNAS-I revela una fertilidad moderada con marcada variabilidad en los niveles de pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), factores clave que condicionan la disponibilidad de nutrientes

esenciales para los cultivos. El pH varía entre 5,42 y 7,70, predominando suelos ligeramente ácidos a neutros; en las zonas más ácidas, como C1 y C5, podría ser necesario aplicar cal agrícola para mejorar la disponibilidad de nutrientes (Brady & Weil, 2008). La materia orgánica oscila entre 2,15 % y 3,85 %, con mayores valores en C4 y C3, lo cual favorece la retención de humedad, la actividad microbiana y la estructura del suelo; en contraste, C6 y C5 presentan niveles más bajos, por lo que se recomienda incorporar residuos orgánicos o abonos verdes para su recuperación (Lal, 2015). El contenido de nitrógeno total varía entre 0,12 % y 0,19 %, con niveles más altos en C4 y C3, adecuados para cultivos exigentes, mientras que C6 y C5 podrían requerir fertilización nitrogenada para evitar deficiencias que limiten el crecimiento vegetal (Marschner, 2012). En cuanto al fósforo disponible, los valores fluctúan entre 9,07 ppm y 20,59 ppm; C4 y C3 presentan concentraciones altas, pero C2 y C6 muestran niveles bajos que justificarían ajustes en la fertilización fosfatada para mejorar el desarrollo radicular y la floración (Havlin et al., 2014). Por último, el potasio disponible se encuentra entre 95,46 ppm y 163,93 ppm, con C5 y C3 mostrando valores óptimos, mientras que C2, con el nivel más bajo, podría beneficiarse de una fertilización potásica para fortalecer la resistencia al estrés y mejorar la calidad de los frutos (Sparks, 2014).

Considerando que los suelos del fundo FUNAS-I presentan limitaciones en cuanto a profundidad efectiva y fertilidad variable, se recomienda priorizar el cultivo de especies anuales de ciclo corto y mediano, como frijoles, maíz y ajíes, que presentan menores exigencias radiculares y se adaptan mejor a suelos con menor profundidad y fertilidad moderada. Estas especies permiten una mayor rotación, reducen la presión sobre el suelo y favorecen su recuperación.

Con base en los resultados obtenidos en las siete calicatas, se propone sectorizar el fundo en tres zonas según el nivel de fertilidad:

- **Zona de alta fertilidad (C2, C3, C5, C7):** apta para cultivos exigentes como, hortalizas, ajíes, maíz y arroz. Se recomienda mantener la cobertura vegetal y aplicar fertilización orgánica para conservar la calidad del suelo.
- **Zona de fertilidad media (C1, C6):** adecuada para cultivos intermedios como maíz, plátano y yuca. Se sugiere incorporar abonos orgánicos y realizar rotaciones con leguminosas.
- **Zona de baja fertilidad (C4):** preferible para cultivos rústicos, especies tolerantes o como áreas de recuperación. Se recomienda establecer coberturas vegetales y aplicar enmiendas orgánicas para mejorar gradualmente la calidad del suelo.

La propuesta de manejo sostenible se orienta a corregir las deficiencias y mantener la fertilidad a largo plazo mediante prácticas agroecológicas. Para calicatas con bajo contenido de MO (como C5 y C6), se recomienda la incorporación de compost, estiércol estabilizado o abonos verdes, lo cual mejorará la estructura del suelo, la retención de humedad y la actividad biológica. En suelos ácidos (como C1 y C5), se propone la aplicación de cal agrícola para elevar el pH y optimizar la disponibilidad de nutrientes. Además, se sugiere realizar rotaciones con cultivos fijadores de nitrógeno (como leguminosas) para mejorar el contenido de N de forma natural y reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

En zonas con bajos niveles de P y K (como C2 y C6), se recomienda ajustar la fertilización mediante insumos orgánicos o de liberación controlada, aplicados de forma localizada para minimizar las pérdidas por lixiviación. Finalmente, se plantea implementar coberturas vegetales, prácticas de mínima labranza y manejo integrado de cultivos para proteger el suelo, conservar la humedad, reducir la erosión y favorecer la sostenibilidad productiva del sistema agrícola en el fundo de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en Tingo María.

V. CONCLUSIONES

1. Se efectuó la distribución espacial en los terrenos del Fundo de la Facultad de agronomía, de la Universidad nacional Agraria de la selva, efectuando los mapas de pH (reacción del suelo), CIC, K, P, N, y MO (materia orgánica).
2. La densidad aparente y la clase textural en las siete calicatas revela que los horizontes superficiales (Hz A y AC) presentan menor densidad aparente (1,00 a 1,35 g/cm³) y texturas franco y franco-arenoso y las capas profundas (C1, C2 y C3) muestran un incremento en la densidad aparente (hasta 1,67 g/cm³) con predominio de texturas arena franca y arena.
3. El pH o reacción del suelo, aumenta con la profundidad, mientras que la materia orgánica y el nitrógeno disminuyen, el fósforo y potasio disponibles se reducen en profundidad, al igual que la CIC afectando la disponibilidad de calcio, magnesio y potasio.
4. Los mapas de distribución del FUNAS-I muestran que el 43 % del área presenta suelos ligeramente ácidos, la MO varía entre 2,33 % y 3,85 %, con necesidad de mejoras en C-6 y C5 (Platanal y bambú), el nitrógeno y fósforo son limitantes en C6 y C2 (bambú y arrozal al fonde del fundo), el potasio es bajo en C2 (arrozal al fonde del fundo).
5. El suelo del fundo FUNAS-I presenta fertilidad moderada a baja con variaciones significativas en pH, MO, N, P y K. Se recomienda mejorar las áreas deficientes mediante aplicación de materia orgánica, corrección del pH y fertilización localizada, estas prácticas favorecen una producción sostenible y conservan la salud del suelo a largo plazo.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Implementar estrategias de investigación y gestión que sean integrales y adaptativas, considerando las variaciones notables en propiedades físicas-químicas a distintas profundidades del suelo, conducentes a empezar a desarrollar una Agricultura de Precisión.
2. Aprovechar estos resultados para realizar trabajos de investigación con un MNSE, que considera la fertilidad del suelo, el predominio de pH ligeramente alcalino y neutro, y los bajos niveles de materia orgánica, nitrógeno y fósforo.
3. Establecer un programa de monitoreo continuo para evaluar cambios en las propiedades del suelo y ajustar las estrategias de gestión en consecuencia.
4. Trabajar con mayor cantidad de calicatas y en base a la fisiografía o paisaje del terreno para futuros estudios de distribución espacial.

VII. REFERENCIAS

- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soil: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer Science y Business Media.
- Arvidsson, J., Persson, M., & Fransson, L. (2012). Traffic-induced soil compaction—Effects on soil properties and crop growth. *Soil and Tillage Research*, 121, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.008>
- Azabache, L. A. (2003). *Fertilidad de suelos para una agricultura sostenible*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Barrow, N. (2018). Understanding and improving nutrient use efficiency in plants. In M. J. Hawkesford & P. Barraclough (Eds.), *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. Wiley.
- Benton, J. (2012). *Plant nutrition and soil fertility manual* (2nd ed.). CRC Press.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>
- Brady, N. C., Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Pearson Prentice Hall.
- Brindis, A. I., Palma, D. J., Zavala, J., Mata, E. E., & López, Y. I. (2020). Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en planicies y terrazas de Tabasco, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), e090919. <https://www.redalyc.org/journal/943/94366149006/html/>.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., McDaniel, P. A. (2003). *Soil genesis and classification*. John Wiley y Sons.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Agronomía. Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- Buzai, G. (2013). *Sistemas de información geográfica SIG: teoría y aplicación* (1a ed.). Universidad Nacional de Luján.
- Cabero, M. (2014). *Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz en la zona de Babahoyo, provincia de Los Ríos* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio institucional <http://repositorio.utb.edu.ec/handle/123456789/5678>.
- Castilla, E. E. (2015). *Influencia de factores edáficos sobre la diversidad y distribución espacial de nemátodos de vida libre* [Trabajo de grado, Universidad de Sucre]. Repositorio

- Institucional Unisucre. <https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/9ccc1b2a-01d7-4ffd-ae80-63812e1ff916/content>.
- Chica, J. A. (2018). *Interpolación spline y aplicación a las curvas de nivel* [Trabajo final de grado, Universitat de Barcelona]. Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona. <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/122512/2/memoria.pdf>.
- Conti, M. E. (2004). *Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo*. Universidad de Buenos Aires.
- Dexter, A. R., Czyż, E. A., Richard, G. (2008). Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*, 307(1-2), 151-162. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9596-6>
- Environmental Law Alliance Worldwide. (2021). *Conceptos básicos para un muestreo de suelos* (Módulo 4 de la Guía básica de muestreo ambiental para comunidades). ELAW. <https://elaw.org/wp-content/uploads/2023/01/Guia-para-la-recoleccion-de-muestras-ambientales-Modulo-4-Espanol.pdf>.
- Espinoza, A. (2006). Zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en las provincias de Bolívar, Cotopaxi, Chimborazo. Bolivia.
- Esri. (2006). *ArcMap* (Vol. 12, pp. 38-43). Shepards Method.
- Fallas, J. (2003). *Comparación de dos métodos de interpolación para elaborar un modelo de elevación digital a partir de curvas de nivel a escala 1:200,000 para Costa Rica* [Tesis de maestría, Universidad Nacional]. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Ciencias Ambientales.
- García, K. M. (2010). *Representación geográfica 3D de la contaminación del aire en algunos sectores de la capital guatemalteca* [Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0461_CS.pdf.
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: Una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v35n2/pyf01212.pdf>.
- Guerrero, J. (2015). Especialmente sobre GNU/Linux, código Python y Sistemas de Información Geográfica (SIG), interpolación, 2(1), 12-14.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2014). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press.

- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321(1-2), 117-152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9857-8>
- Hirel, B., Tétu, T., & Lea, P. J. (2007). Ammonia assimilation in higher plants: origin of the substrates. *Journal of Experimental Botany*, 59(9), 2473-2482. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern127>
- Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. (2011). *Manual práctico: Muestreo de suelos con fines de fertilización de cultivos*. ICTA. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Suelos/Muestreo%20de%20suelos%20con%20fines%20de%20fertilizacion0001.pdf>.
- Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (2011). *Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la Provincia de Bolívar*. Quito, Ecuador. 27 p.
- Iqbal, J., Thomasson, J., Jenkins, J., Owens, P., & Whisler, F. (2005). Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1338-1350. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0154>
- Jaramillo J. D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.2002.pdf>.
- Jaramillo, D. F., González, H., & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10-19. <http://repositorio.puce.edu.ec>
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Fresco, L. O. (2016). The significance of soil and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*, 2(2), 111-128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Lal, R. (2015). Soil degradation by erosion. *Land Degradation Development*, 12(6), 519-539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(2), 395-419
- Marschner, H. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00017-8>
- Marschner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22669-3>

- Meza, C. (2014). *Aplicación del Sistema de Información Geográfica (SIG) en el modelamiento del río Ucayali: Identificación de los cambios y su influencia ambiental (Sector Pucallpa)*. 25 p.
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Microzonificación Ecológica Económica de la provincia constitucional del Callao*. 44 p. <https://sinia.minam.gob.pe/>
- Mora, F., Muñoz, R., Meza, V., Fonseca, W. (2015). Factores edáficos que influyen en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 71–89. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v39n1/a06v39n1.pdf>.
- Navarro. (2003). *Botánica de los cultivos tropicales* (1ra ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Obando, F., Villegas, A., Betancur, J., & Echeverri, L. (2006). Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 59(1), 3217-3235. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/20994>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4ta ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2009). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3ra ed.). Ediciones Mundi-Prensa. <http://example.com/edafologia2009>
- Porta, J., Reguerín, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente* (3ra ed.). Mundi-Prensa. <http://example.com/edafologia2003>
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1-2), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Red de Buenas Prácticas Agrícolas. (2020). *Recomendaciones para muestreo de suelos*. <https://redbpa.org.ar/wp-content/uploads/2021/04/EP-RedBPA-MuestreoDe-Suelos.pdf>.
- Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., & Harvey, P. R. (2009). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 321(1-2), 1-39. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9894-0>
- Rodríguez, H. (2011). *Métodos de suelos y plantas: Criterios de interpretación*. Editorial.

- Rodríguez, J., González, A. M., Leiva, F. R., & Guerrero, L. (2008). Fertilización por sitio específico en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 308–321. <https://www.scielo.org.co/pdf/agc/v26n2/v26n2a16.pdf>.
- Sadeghian, S. (2018). *Interpretación de los resultados de análisis de suelo: Soporte para una adecuada nutrición de cafetales*. Fondo Nacional del Café, Gerencia Técnica – Programa de Investigación Científica, Cenicafé.
- Sastre, P. (2010, abril). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): Técnicas básicas para estudios de biodiversidad*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2018/08/Sistemas-de-Informaci%C3%B3n-Geogr%C3%A1fica-SIG-T%C3%A9cnicas-b%C3%A1sicas-para-estudios-de-biodiversidad.pdf>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2006). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Soane, B. D., van Ouwerkerk, C., & Sommer, C. (2010). An overview of the role of soil organic matter in maintaining soil physical and chemical fertility. In S. P. McGrath (Ed.), *Organic matter and mineral behaviour: Soils and sediments* (pp. 3-18). Geological Society. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1988.041.01.01>
- Sparks, D. L. (2014). *Environmental soil chemistry*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656446-4.X5000-8>
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195313697.001.0001>
- Suárez, G. M. (2014). Apuntes sobre la zonificación agroecológica de los cultivos: Particularidades en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 36–44. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v35n4/ctr05414.pdf>
- Syers, J. K., Johnston, A. E., Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/a1595e/a1595e00.htm>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development*. Sinauer Associates. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780878938667.001.0001>
- Tapia, E. M. (1999). *Zonificación agroecológica basada en el uso de la tierra, el conocimiento local y las alternativas de producción*. Perú. http://example.com/zonificacion_agroecologica

- Vargas, R. E., Galindo, J. R., Giraldo, R., Varón, V. M., Wilches, W. A., & Franco, C. V. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, *10*(1), e4118. Universidad Central del Ecuador. <https://www.redalyc.org/journal/6538/653873378009/653873378009.pdf>.
- White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, *105*(7), 1073-1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>.

ANEXOS



Figura 13. Imágenes de las calicatas realizadas en el experimento



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GARCIA PINEDO FERNANDO GEANN PIEREE

N°	CODIGO DEL LABORATORIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	CALICATA	N°	LECTURA DE CALICATA	CULTIVO ACTUAL	RENDIMIENTO (Kg/Ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	DENSIDAD DE SIEMBRA	EDAD DEL CULTIVO (AÑOS)	COORDENADAS		
														LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m.s.n.m.)
1	S0208	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 1	1	H _z A	—	—	—	—	—	18 L 0390631	UTM 8969651	600
2	S0209	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 1	2	H _z AC	—	—	—	—	—	18 L 0390631	UTM 8969651	600
3	S0210	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 1	3	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390631	UTM 8969651	600
4	S0211	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 1	4	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390631	UTM 8969651	600
5	S0212	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 2	5	H _z A	—	—	—	—	—	18 L 0390803	UTM 8969723	638
6	S0213	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 2	6	H _z CA	—	—	—	—	—	18 L 0390803	UTM 8969723	638
7	S0214	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 2	7	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390803	UTM 8969723	638

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%				
	CODIGO DEL LABORATORIO	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	Arena	Arcilla	Limo							Textura	Ca	Mg	K	Na	Al					H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
			%	%	%																				
1	S0208	1.250	42	22	36	Franco	5.42	2.96	0.15	12.94	105.95	8.37	6.70	0.82	0.13	0.11	0.50	0.11	8.37	93	7	6			
2	S0209	1.351	39	24	37	Franco	5.24	1.25	0.06	6.53	50.48	6.87	5.40	0.63	0.08	0.03	0.70	0.04	6.87	89	11	10			
3	S0210	1.471	85	13	2	Arena Franca	6.73	0.90	0.04	9.07	59.47	3.50	2.79	0.53	0.11	0.08	0.00	0.00	3.50	100	0	0			
4	S0211	1.613	81	14	5	Arena Franca	7.11	0.81	0.04	8.04	92.46	2.52	1.81	0.51	0.11	0.09	0.00	0.00	2.52	100	0	0			
5	S0212	1.250	55	17	28	Franco Arenoso	6.02	3.22	0.16	9.07	95.46	9.45	7.52	1.69	0.16	0.08	0.00	0.00	9.45	100	0	0			
6	S0213	1.316	51	24	25	Franco Arcillo - Arenoso	6.31	1.88	0.09	4.64	84.46	7.23	5.83	1.24	0.11	0.05	0.00	0.00	7.23	100	0	0			
7	S0214	1.351	53	28	19	Franco Arcillo Arenoso	7.19	1.25	0.06	10.68	80.96	7.74	6.22	1.38	0.12	0.03	0.00	0.00	7.74	100	0	0			

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
 RECIBO No. 001-0644581
 TINGO MARÍA, 01 DE MARZO 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 14. Análisis de calicata 1 y 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Carretera Central Km 1.21 - Tingo Maria - CELULAR 944407531
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
 analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GARCIA PINEDO FERNANDO GEANN PIEREE																
N°	CODIGO DEL LABORATORIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	CALICATA	N°	LECTURA DE CALICATA	CULTIVO ACTUAL	FERTILIZANTE O (Kg/ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	ORDEN DE MUESTRA	ESTADO DEL CULTIVO (años)	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)
														LATITUD	LONGITUD	
8	S0215	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 3	8	Hz O	—	—	—	—	—	18 L 0390683	UTM 8969801	685
9	S0216	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 3	9	Hz A	—	—	—	—	—	18 L 0390683	UTM 8969801	685
10	S0217	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 3	10	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390683	UTM 8969801	685
11	S0218	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 3	11	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390683	UTM 8969801	685
12	S0219	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 3	12	C3 (capa 3)	—	—	—	—	—	18 L 0390683	UTM 8969801	685
13	S0220	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 4	13	Hz O	—	—	—	—	—	18 L 0390623	UTM 8969780	621
14	S0221	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 4	14	Hz A	—	—	—	—	—	18 L 0390623	UTM 8969780	621
15	S0222	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 4	15	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390623	UTM 8969780	621
16	S0223	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 4	16	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390623	UTM 8969780	621
17	S0224	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 4	17	C3 (capa 3)	—	—	—	—	—	18 L 0390623	UTM 8969780	621

N°	DATOS		ANÁLISIS MECANICO				pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%
	CODIGO DEL LABORATORIO	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)	Arena	Arcilla	Limo	Textura							Ca	Mg	K	Na	Al	H				
			%	%	%																	
8	S0215	1.214	55	18	27	Franco Arenoso	7.07	3.49	0.17	16.43	136.44	16.10	14.13	1.65	0.31	0.02	0.00	0.00	16.10	100	0	0
9	S0216	1.220	67	14	19	Franco Arenoso	7.57	3.31	0.17	11.53	92.96	11.61	10.36	1.05	0.15	0.05	0.00	0.00	11.61	100	0	0
10	S0217	1.136	49	20	31	Franco	7.59	1.52	0.08	5.30	75.47	10.23	9.04	0.98	0.16	0.05	0.00	0.00	10.23	100	0	0
11	S0218	1.389	45	22	33	Franco	7.68	1.34	0.07	5.87	45.48	9.18	8.14	0.91	0.11	0.01	0.00	0.00	9.18	100	0	0
12	S0219	1.471	39	16	45	Franco	8.13	0.54	0.03	10.49	95.96	4.16	3.61	0.41	0.08	0.05	0.00	0.00	4.16	100	0	0
13	S0220	-1.000	69	14	17	Franco Arenoso	5.90	3.85	0.19	20.59	103.95	9.72	7.82	1.60	0.27	0.03	0.00	0.00	9.72	100	0	0
14	S0221	1.163	59	16	25	Franco Arenoso	7.50	2.15	0.11	15.87	69.97	7.36	5.58	1.66	0.11	0.01	0.00	0.00	7.36	100	0	0
15	S0222	1.613	83	12	5	Arena Franca	7.47	0.81	0.04	14.93	46.48	4.99	4.27	0.63	0.08	0.02	0.00	0.00	4.99	100	0	0
16	S0223	1.608	85	12	3	Arena Franca	7.84	0.45	0.02	10.30	50.48	3.54	2.95	0.46	0.10	0.02	0.00	0.00	3.54	100	0	0
17	S0224	1.563	85	11	4	Arena Franca	8.28	0.36	0.02	12.28	84.96	2.47	2.01	0.33	0.09	0.04	0.00	0.00	2.47	100	0	0

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
 RECIBO No. 001-0644581
 TINGO MARIA, 01 DE MARZO 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo Maria

[Firma]
 Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 15. Análisis de calicata 3 y 4



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología
analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GARCIA PINEDO FERNANDO GEANN PIEREE																
N°	CODIGO DEL LABORATORIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	CALICATA	N°	LECTURA DE CALICATA	CULTIVO ACTUAL	RENDIMIENTO (Kg/ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	TEMPERATURA DEL SUELO (°C)	HUMEDAD DEL SUELO (%)	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m.)
														LATITUD	LONGITUD	
18	S0225	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 5	18	H _z A	—	—	—	—	—	18 L 0390644	UTM 8969987	612
19	S0226	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 5	19	H _z AC	—	—	—	—	—	18 L 0390644	UTM 8969987	612
20	S0227	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 5	20	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390644	UTM 8969987	612
21	S0228	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 5	21	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390644	UTM 8969987	612
22	S0229	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 6	22	H _z A	—	—	—	—	—	18 L 0390416	UTM 8970012	663
23	S0230	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 6	23	H _z AC	—	—	—	—	—	18 L 0390416	UTM 8970012	663
24	S0231	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 6	24	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390416	UTM 8970012	663
25	S0232	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 6	25	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390416	UTM 8970012	663
26	S0233	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 6	26	C3 (capa 3)	—	—	—	—	—	18 L 0390416	UTM 8970012	663

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%				
	CODIGO DEL LABORATORIO	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	Arena	Arcilla	Limo							Textura	Ca	Mg	K	Na	Al					H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
			%	%	%																				
18	S0225	1.064	50	16	34	Franco	5.84	2.51	0.13	10.02	163.93	8.92	7.49	1.25	0.13	0.05	0.00	0.00	8.92	100	0	0			
19	S0226	1.136	44	19	37	Franco	6.10	1.88	0.09	3.79	86.96	6.48	5.54	0.79	0.09	0.05	0.00	0.00	6.48	100	0	0			
20	S0227	1.563	79	12	9	Arena Franca	6.60	1.07	0.05	9.07	142.44	5.23	4.41	0.65	0.11	0.07	0.00	0.00	5.23	100	0	0			
21	S0228	1.558	85	12	3	Arena Franca	7.22	0.36	0.02	6.81	77.47	2.76	2.30	0.37	0.06	0.03	0.00	0.00	2.76	100	0	0			
22	S0229	1.190	41	16	43	Franco	6.68	2.33	0.12	9.36	107.95	9.14	7.86	1.05	0.18	0.05	0.00	0.00	9.14	100	0	0			
23	S0230	1.282	53	14	33	Franco Arenoso	6.00	1.79	0.09	3.60	40.48	7.71	6.64	0.91	0.09	0.06	0.00	0.00	7.71	100	0	0			
24	S0231	1.515	83	12	5	Arena Franca	7.95	1.61	0.08	5.87	45.48	3.95	3.49	0.34	0.07	0.06	0.00	0.00	3.95	100	0	0			
25	S0232	1.563	93	7	0.1	Arena	8.54	1.25	0.06	5.11	24.49	3.95	3.72	0.16	0.05	0.02	0.00	0.00	3.95	100	0	0			
26	S0233	1.667	91	8	1	Arena	8.72	0.18	0.01	5.20	32.49	4.73	4.49	0.17	0.05	0.02	0.00	0.00	4.73	100	0	0			

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
 RECIBO No. 001-0644581
 TINGO MARIA, 01 DE MARZO 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María



[Firma]
 Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 16. Análisis de calicata 5 y 6



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: GARCIA PINEDO FERNANDO GEANN PIEREE

N°	CODIGO DEL LABORATORIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	SECTOR	CALICATA	N°	LECTURA DE CALICATA	CULTIVO ACTUAL	RENDIMIENTO (kg/ha)	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (cm)	SISTEMA DE RIGORÍA	EQUILIBRIO QUÍMICO (g/kg)	COORDENADAS		
														LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m.s.n.m.)
27	S0234	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 7	27	Hz A	—	—	—	—	—	18 L 0390462	UTM 8970183	650
28	S0235	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 7	28	C1 (capa 1)	—	—	—	—	—	18 L 0390462	UTM 8970183	650
29	S0236	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 7	29	C2 (capa 2)	—	—	—	—	—	18 L 0390462	UTM 8970183	650
30	S0237	HUANUCO	LEONCIO PRADO	RUPA RUPA	UNAS	CALICATA 7	30	C3 (capa 3)	—	—	—	—	—	18 L 0390462	UTM 8970183	650

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO			pH	M.O.	N	P	K	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	%	%	%									
	CODIGO DEL LABORATORIO	DENSIDAD APARENTE (g/cm³)	Arena	Arcilla	Limo							Textura	1:1	%	%	ppm	ppm					Ca	Mg	K	Na	Al	H	Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
			%	%	%																									
27	S0234	1.000	47	20	33	Franco	7.70	2.96	0.15	13.15	100.46	10.34	8.78	1.12	0.35	0.09	0.00	0.00	10.34	100	0	0								
28	S0235	1.515	85	10	5	Arena Franca	8.41	1.34	0.07	7.56	50.98	4.23	3.75	0.36	0.06	0.06	0.00	0.00	4.23	100	0	0								
29	S0236	1.389	53	22	25	Franco Arcillo Arenoso	8.49	1.25	0.06	11.49	55.98	7.48	6.66	0.69	0.09	0.04	0.00	0.00	7.48	100	0	0								
30	S0237	1.282	54	21	25	Franco Arcillo Arenoso	8.71	0.99	0.05	9.82	31.99	7.57	6.86	0.59	0.08	0.04	0.00	0.00	7.57	100	0	0								

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
RECIBO No. 001-0644581
TINGO MARÍA, 01 DE MARZO 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María



Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 17. Análisis de calicata 7

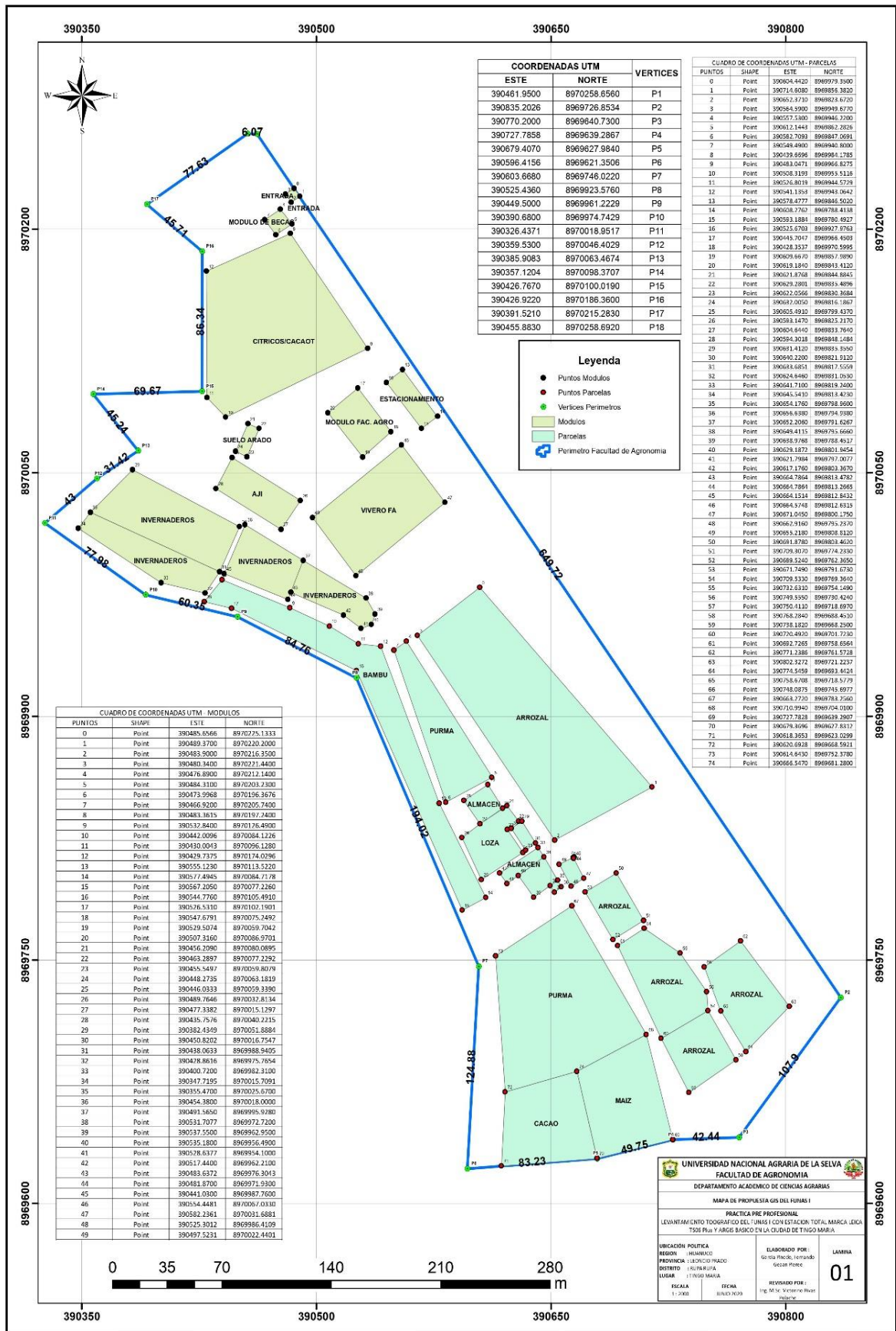


Figura 18. Levantamiento topográfico del FUNAS I, Facultad de agronomía (UNAS)

Tabla 6. Coordenadas UTM y su altitud de las calicatas del estudio

N° Calicatas	Código	N°	Muestra	Lectura	Coordenadas	Elevación
Calicata 1	208	1	M1	Hz A	18 L 0390631 UTM 8969651	600 MSNM
	209	2	M2	Hz Ac		
	210	3	M3	C1 (Capa 1)		
	211	4	M4	C2 (Capa 2)		
Calicata 2	212	5	M1	Hz A	18 L 0390803 UTM 8969723	638 MSNM
	213	6	M2	Hz Ca		
	214	7	M3	C1 (Capa 1)		
Calicata 3	215	8	M1	Hz O	18 L 0390685 UTM 8969801	685 MSNM
	216	9	M2	Hz A		
	217	10	M3	C1 (Capa 1)		
	218	11	M4	C2 (Capa 2)		
	219	12	M5	C3 (Capa 3)		
Calicata 4	220	13	M1	Hz O	18 L 0390623 UTM 8969780	621 MSNM
	221	14	M2	Hz A		
	222	15	M3	C1 (Capa 1)		
	223	16	M4	C2 (Capa 2)		
	224	17	M5	C3 (Capa 3)		
Calicata 5	225	18	M1	Hz A	18 L 0390644 UTM 8969987	612 MSNM
	226	19	M2	Hz Ac		
	227	20	M3	C1 (Capa 1)		
	228	21	M4	C2 (Capa 2)		
Calicata 6	229	22	M1	Hz A	18 L 0390416 UTM 8970012	663 MSNM
	230	23	M2	Hz Ac		
	231	24	M3	C1 (Capa 1)		
	232	25	M4	C2 (Capa 2)		
	233	26	M5	C3 (Capa 3)		
Calicata 7	234	27	M1	Hz A	18 L 0390462 UTM 8970185	650 MSNM
	235	28	M2	C1 (Capa 1)		
	236	29	M3	C2 (Capa 2)		
	237	30	M4	C3 (Capa 3)		

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMIA

Tingo María, 09 de enero de
2022

Dr. JOSE W. ZAVALA SOLORZANO
Decano de la Facultad de Agronomía

ASUNTO: Solicitar permiso para la construcción de calicatas en el fundo agrícola de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Con mucho agrado me dirijo a usted por intermedio del presente documento, que habiendo aprobado mi proyecto de tesis denominado "Distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del fundo de la Facultad de Agronomía, en Tingo María" con la Resolución Nro. 317-2021/D-FA-UNAS solicito a usted el permiso para la construcción de calicatas en el fundo agrícola de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, que se viene ejecutando juntamente con el asesor.

Sin otro en particular, me despido de usted sin antes desearle muchos éxitos en su vida profesional.

Atentamente:



.....
Victorino Rivas Pulache
Asesor



.....
Fernando Geaan P. García Pinedo
Tesista

ADJUNTO: Resolución de aprobación de mi tesis.

Figura 19. Permiso para la construcción de calicatas en FUNAS I, Facultad de agronomía (UNAS)