

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
QUÍMICA INDUSTRIAL**



PROYECTO DE GRADO

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE ACIDEZ EN EL SUELO POR
ACCIÓN DE LA DOLOMITA, MEJORANDO LAS
CONDICIONES PARA EL CULTIVO DE CAFÉ CATUAÍ ROJO
(*Coffea arabica L.*) EN EL CANTÓN DE CHIJCHIPANI DEL
MUNICIPIO DE CARANAVI DEL DEPARTAMENTO DE LA
PAZ**

PARA OPTAR EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN QUÍMICA INDUSTRIAL

POR: UNIV. ERVIN CALDERON VASQUEZ

**TUTOR: MSC. ING. JANNETH MANNINA QUISPE
YANAHUAYA**

COTUTOR: LIC. PABLO PACOHUANCA ESCALIER

**La Paz-Bolivia
2022**

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme la vida, brindarme salud y poner en mi camino a excelentes personas. Todo esto me permitió concluir uno de los ciclos más importantes de mi vida.

A **mis padres** por todo, me brindaron absolutamente todo para llegar hasta donde estoy.

A **mis hermanos** por el apoyo sin condiciones en todo momento desde que tengo memoria.

A la carrera de **Química Industrial** de la **Universidad Mayor de San Andrés** por alojarme en sus ambientes, brindarme conocimiento y las herramientas necesarias para mi formación profesional.

A mi tutora **Ing. Janneth Mannina Quispe** por su asesoramiento, tiempo, apoyo y dedicación brindada en todo momento.

A mi tutor **Lic. Pablo Pacohuanca Escalier** por brindarme su tiempo, apoyo, dedicación en todo momento, por la formación académica desde el primer año y por demostrar que no solo es un gran profesional si no también una gran persona.

A mi tribunal **Lic. Rafael Onofre Montes** por la colaboración en todo momento al desarrollar el presente trabajo, orientándome, teniendo paciencia y brindándome su tiempo para la revisión de este documento.

A mi tribunal **Lic. Jorge Velasco Orellano** por su orientación, paciencia y tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A la **Lic. Patricia Duchén Uriarte** por todo el apoyo brindado en los últimos años, como docente, como Directora de Carrera y sobre todo como persona.

DEDICATORIA

A Dios que en su infinita bondad me brindo una familia y amigos incomparables.

A mis padres Vicente Calderón y Erika Vásquez por guiarme, educarme y por su amor incondicional. Se los debo todo.

A mis hermanos Sonia y Daniel por todo su apoyo incondicional y absolutamente por todo lo que vivimos.

A toda mi familia, especialmente a mi tío Carlos Calderón, que me apoyo en mi formación como persona y como profesional.

A mis amigos Richard, Grover, Mike, Kevin, Efra, Rider, Percy, Fer, Maria, Liz, Danna que a pesar del tiempo demostraron que la verdadera amistad y la lealtad existen (perdón si me olvido de alguien a todos los quiero chic@s).

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	1
1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1.	Árbol de Problemas.....	2
1.2.	Planteamiento del problema.....	3
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	Objetivo General	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
3.	JUSTIFICACION	4
4.	FUNDAMENTO TEORICO.....	4
4.1.	El cultivo de café	4
4.1.1.	Origen.....	4
4.1.2.	Importancia del café en Bolivia	4
4.1.3.	Clasificación taxonómica	6
4.1.4.	Clasificación botánica	6
4.1.5.	Fases fenológicas.....	8
4.1.6.	Elementos esenciales para el cultivo de café	8
4.2.	El suelo	9
4.2.1.	Funciones del suelo.....	9
4.2.2.	Propiedades físicas del suelo y su impacto en los cultivos.....	10
4.2.3.	Propiedades químicas del suelo y su impacto en los cultivos	11
4.2.4.	Suelos ácidos	15
4.3.	El encalado	19
4.3.1.	Efecto de la cal en suelos ácidos.....	20
4.3.2.	Criterio de encalado.....	21
4.3.3.	Calidad del material encalante.....	21
4.3.4.	Tipos de material encalante y su composición	22
4.3.5.	La dolomita	22
4.4.	Restauración del suelo ácido	23
4.5.	Porcentaje de saturación de aluminio deseado.....	24
5.	PARTE EXPERIMENTAL.....	24
5.1.	TAMAÑO Y LOCALIZACION	24
5.1.1.	Tamaño	24

5.1.2.	Localización	25
5.1.3.	Características ecológicas	27
5.2.	Diagrama para la determinación de dosis de dolomita.....	28
5.3.	Identificación de la parcela.....	29
5.4.	Muestreo de suelos	29
5.4.1.	Materiales	29
5.4.2.	Procedimiento.....	29
5.5.	Análisis de la muestra de suelo.....	31
5.5.1.	Preparación de la muestra.....	31
5.5.2.	Determinación de pH y conductividad	32
5.5.3.	Determinación de la textura	34
5.5.4.	Determinación de la densidad aparente y densidad real	35
5.5.5.	Determinación de la humedad y materia orgánica.....	36
5.5.6.	Determinación de la acidez intercambiable y aluminio intercambiable ..	37
5.5.7.	Determinación de calcio y magnesio intercambiable	41
5.5.8.	Determinación de nitrógeno.....	44
5.5.9.	Determinación de sodio y potasio.....	47
5.5.10.	Determinación de Fosforo total	49
5.5.11.	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico CIC.....	52
5.6.	Análisis de la dolomita.....	52
5.6.1.	Determinación de calcio y magnesio	52
5.6.2.	Determinación del poder relativo de neutralización total (PRNT)	53
5.7.	Determinación del crecimiento de la planta.....	53
5.7.1.	Material.....	53
5.7.2.	Procedimiento.....	53
5.8.	Diseño experimental.....	54
5.8.1.	Modelo lineal aditivo	54
5.8.2.	Características del campo experimental.....	54
5.8.3.	Variables de respuesta	55
6.	DATOS, CALCULOS Y RESULTADOS	56
6.1.	Determinación de las características físicas y químicas del suelo	56
6.1.1.	Determinación de pH y conductividad	56
6.1.2.	Determinación de textura.....	56
6.1.3.	Determinación de la densidad	58

6.1.4.	Determinación de la humedad y materia orgánica.....	59
6.1.5.	Determinación de la acidez intercambiable	61
6.1.6.	Determinación de calcio y magnesio	64
6.1.7.	Determinación de nitrógeno total	67
6.1.8.	Determinación de sodio y potasio.....	69
6.1.9.	Determinación de fósforo total.....	72
6.1.10.	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)	75
6.1.11.	Relación entre bases intercambiables.....	76
6.2.	Análisis de la dolomita.....	78
6.2.1.	Determinación de calcio y magnesio	78
6.2.2.	Determinación del poder relativo de neutralización total (PRNT)	80
6.3.	Determinación de la cantidad de dolomita a aplicar por planta	81
6.3.1.	Datos	81
6.3.2.	Cálculos.....	81
6.3.3.	Resultados.....	82
6.4.	Determinación del crecimiento de la planta.....	82
6.4.1.	Datos	82
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	84
7.1.	Análisis e interpretación de resultados para la muestra inicial	84
7.2.	Efecto de la incorporación de dolomita en el suelo	88
7.2.1.	pH.....	88
7.2.2.	Conductividad eléctrica.....	89
7.2.3.	Densidad real.....	91
7.2.4.	Materia orgánica	92
7.2.5.	Acidez intercambiable.....	93
7.2.6.	Aluminio intercambiable.....	94
7.2.7.	Calcio intercambiable	96
7.2.8.	Magnesio intercambiable	97
7.2.9.	Capacidad de intercambio catiónico	98
7.3.	Efecto de la incorporación de dolomita en la planta	99
7.3.1.	Altura de la planta.....	99
7.3.2.	Diámetro de la planta.....	99
7.3.3.	Numero de ramas de la planta.....	100
7.3.4.	Numero de hojas de la planta	101

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
8.1. Conclusiones.....	102
8.2. Recomendaciones.....	103
9. BIBLIOGRAFÍA	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Regiones productoras de café en Bolivia.....	5
Tabla 2: Rangos de pH en el suelo.....	11
Tabla 3: Tipos de material encalante y su composición.	22
Tabla 4: Clasificación de cales que contienen magnesio.	23
Tabla 5: Porcentaje de saturación de aluminio máximo en cultivos.....	24
Tabla 6: Información de la parcela.....	29
Tabla 7: Lista de materiales para el muestreo de suelos.....	29
Tabla 8: Materiales para preparación de la muestra.....	31
Tabla 9: Equipos para preparación de la muestra	31
Tabla 10: Materiales para la determinación de pH y conductividad.....	32
Tabla 11: Equipos para la determinación de pH y conductividad	33
Tabla 12: Reactivos para medir pH y conductividad.....	33
Tabla 13: Materiales para determinar la textura	34
Tabla 14: Materiales para determinación de la densidad	35
Tabla 15: Equipos para determinación de la densidad	35
Tabla 16: Materiales para determinación de humedad y materia orgánica	36
Tabla 17: Equipos para determinación de humedad y materia orgánica	36
Tabla 18: Materiales para la determinación de acidez intercambiable	37
Tabla 19: Equipos para la determinación de acidez intercambiable	38
Tabla 20: Reactivos para la determinación de acidez intercambiable	38
Tabla 21: Materiales para la determinación de calcio y magnesio.....	41
Tabla 22: Equipos para la determinación de calcio y magnesio	41
Tabla 23: Reactivos para la determinación de calcio y magnesio	41
Tabla 24: Materiales para la determinación de nitrógeno	44
Tabla 25: Equipos para la determinación de nitrógeno.....	45
Tabla 26: Reactivos para la determinación de nitrógeno	45
Tabla 27: Materiales para determinación de sodio y potasio.....	47
Tabla 28: Equipos para determinación de sodio y potasio	47
Tabla 29: Reactivos para determinación de sodio y potasio.....	47
Tabla 30: Materiales para la determinación de Fosforo total	49

Tabla 31: Equipos para la determinación de Fosforo total.....	49
Tabla 32: Reactivos para la determinación de Fosforo total.....	49
Tabla 33: Materiales para la determinación del PRNT	53
Tabla 34: Equipos para la determinación del PRNT	53
Tabla 35: Material para determinación del crecimiento de la planta.....	53
Tabla 36: Resultados de pH y conductividad.....	56
Tabla 37: Datos para la determinación de textura	56
Tabla 38: Resultados de textura	58
Tabla 39: Datos para la determinación de densidad aparente y real.....	58
Tabla 40: Resultados de densidad aparente y real.....	59
Tabla 41: Datos para la determinación de humedad y materia orgánica.....	59
Tabla 42: Resultados de humedad y materia orgánica.....	60
Tabla 43: Datos de masa de suelo para determinación de acidez intercambiable ...	61
Tabla 44: Datos para estandarización de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.....	61
Tabla 45: Datos para determinación de acidez intercambiable y aluminio intercambiable	62
Tabla 46: Resultados de la estandarización de HCl y NaOH.....	63
Tabla 47: Resultados de acidez intercambiable, aluminio intercambiable e hidrogeniones	63
Tabla 48: Datos de la masa de la muestra de suelo.....	64
Tabla 49: Datos para la estandarización de EDTA	64
Tabla 50: Datos para determinar calcio y magnesio	65
Tabla 51: Resultados de la estandarización de EDTA.....	66
Tabla 52: Resultados de calcio y magnesio.....	67
Tabla 53: Masa de la muestra de suelo para determinación de nitrógeno total.....	67
Tabla 54: Ácido clorhídrico estandarizado para la titulación y volumen gastado en la titulación del blanco	68
Tabla 55: Volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación	68
Tabla 56: Resultado de nitrógeno total.....	68
Tabla 57: Masa de la muestra de suelo para determinación de sodio y potasio.....	69
Tabla 58: Diluciones realizadas para la determinación de sodio y potasio.....	69

Tabla 59: Lectura de sodio y potasio en el equipo de absorción atómica, en ppm...	70
Tabla 60: Resultados de sodio y potasio en meq / 100g suelo.....	71
Tabla 61: Masa de muestra de suelo para determinación de fósforo total	72
Tabla 62: Diluciones realizadas para la determinación de fósforo.....	72
Tabla 63: Concentración en ppm y absorbancia de los patrones utilizados para la determinación de fósforo total en la muestra inicial.....	73
Tabla 64: Lectura de absorbancia en la muestra inicial.....	73
Tabla 65: Concentración en ppm y absorbancia de los patrones utilizados para la determinación de fósforo total en las muestras 1 al 9	73
Tabla 66: Lectura de absorbancia de las muestras 1 al 9	74
Tabla 67: Resultados del fósforo total	75
Tabla 68: Datos para la determinación de capacidad de intercambio catiónico	75
Tabla 69: Resultados de la capacidad de intercambio catiónico	76
Tabla 70: Datos para la relación de bases intercambiables para la muestra inicial..	77
Tabla 71: Resultados de relación de bases intercambiables.....	77
Tabla 72: Masa de la muestra de dolomita en mg.....	78
Tabla 73: Datos para la estandarización de EDTA.....	78
Tabla 74: Datos para determinar calcio y magnesio en la dolomita.....	78
Tabla 75: Resultado de EDTA estandarizado.....	79
Tabla 76: Resultados de calcio y magnesio en la dolomita	79
Tabla 77: Datos para la determinación del poder relativo de neutralización.....	80
Tabla 78: Masa de la cantidad de dolomita que atravesó el tamiz	80
Tabla 79: Resultados del poder relativo de neutralización total.....	81
Tabla 80: Datos para la determinación de cantidad de dolomita a aplicar.....	81
Tabla 81: Resultado de la cantidad de dosis dolomita.....	82
Tabla 82: Datos de la planta antes de aplicar la dolomita	82
Tabla 83: Datos del crecimiento de la planta a los 15 días después de haber aplicado la dolomita	83
Tabla 84: Datos del crecimiento de la planta a los 42 días después de haber aplicado la dolomita	83
Tabla 85: Criterios para la interpretación de resultados de la muestra inicial	84

Tabla 86: Análisis e interpretación de resultados para la muestra inicial.....	87
Tabla 87: Análisis de varianza para el pH	88
Tabla 88: Análisis de Varianza para la conductividad eléctrica	90
Tabla 89: Análisis de varianza para la densidad aparente	91
Tabla 90: Análisis de varianza para la materia orgánica	92
Tabla 91: Análisis de varianza para la acidez intercambiable.....	93
Tabla 92: Análisis de varianza para el aluminio intercambiable.....	95
Tabla 93: Análisis de varianza para el calcio intercambiable.....	96
Tabla 94: Análisis de varianza para el magnesio intercambiable	98
Tabla 95: Análisis de varianza para la capacidad de intercambio catiónico	98
Tabla 96: Análisis de varianza para la altura de la planta.....	99
Tabla 97 Análisis de varianza para el diámetro de la planta.....	100
Tabla 98: Análisis de varianza para el numero de ramas de la planta.....	100
Tabla 99: Análisis de varianza para el numero de hojas de la planta	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árbol de problemas.....	2
Figura 2: Clasificación de los nutrientes esenciales para la planta	9
Figura 3: Dimensiones de la parcela en estudio.....	24
Figura 4: Parcela en estudio.....	25
Figura 5: Mapa de cantones del Municipio de Caranavi.....	26
Figura 6: Mapa del cantón de Chijchipani	26
Figura 7: Diagrama para la determinación de dosis de dolomita.....	28
Figura 8: División de la parcela para toma de submuestras.....	30
Figura 9: proceso de extracción de submuestras	30
Figura 10: Cuarteo de muestra.....	31
Figura 11: Tamizado de la muestra.....	32
Figura 12: Determinación de pH y conductividad.....	33
Figura 13: Determinación de la textura	34
Figura 14: Determinación de la densidad.....	36
Figura 15: Determinación de humedad y materia orgánica.....	37
Figura 16: Determinación de acidez intercambiable y aluminio intercambiable	40
Figura 17: Determinación de calcio y magnesio.....	42
Figura 18: Determinación de calcio	43
Figura 19: Determinación de nitrógeno total.....	46
Figura 20: Determinación de sodio y potasio por absorción atómica	48
Figura 21: Determinación de fósforo total por espectrofotometría	51
Figura 22: Diseño de bloques completos al azar.....	55
Figura 23: Triángulo de texturas.....	57
Figura 24: Gráfica de regresión lineal, Absorbancia vs Concentración de fósforo ...	74
Figura 25: Prueba de Duncan (5%) para pH	89
Figura 26: Prueba Duncan para la conductividad eléctrica	90
Figura 27: Prueba Duncan (5%) para la materia orgánica	92
Figura 28: Prueba de Duncan (5%) para la acidez intercambiable	94
Figura 29: Prueba Duncan (5%) para el aluminio intercambiable	95
Figura 30: Prueba Duncan (5%) para el calcio intercambiable.....	97

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el cantón de Chijchipani del Municipio de Caranavi del departamento de La Paz, región en la cual generalmente en los cultivos se presentan problemas de degradación de los suelos por acidez. Bajo ese contexto la investigación presenta el objetivo de evaluar el cambio de acidez en el suelo por acción de la dolomita (cal) y la mejora que presenta la planta del cultivo (café catuaí rojo), evaluado con un análisis experimental en laboratorio y estadísticamente con un diseño de bloques al azar (DBA), con tres bloques y tres tratamientos, haciendo la interpretación en base al análisis de varianza (ANVA) y la prueba de Duncan al 5%. Se realizó un análisis inicial de toda la parcela (1 muestra) y un análisis final de los bloques (9 muestras). Al realizar el análisis inicial para la muestra de suelo se obtuvo como resultado el pH=5,54; CE=42,36(μ S/cm); Textura franco limosa; densidad real=2,5411(g/ml); MO=5,74%; acidez intercambiable=2,21 (meq/100g suelo); Ca= 5,99 (meq/100g suelo); Mg=2,14 (meq/100g suelo); Na=0,0039 (meq/100g suelo); K=0,044 (meq/100g suelo); CIC=10,44 (meq/100g suelo); N=0,86% y P=1,83. Así mismo como resultado del análisis de la dolomita se obtuvo Ca=33,65%; Mg=2,80% y PRNT=90,20%. Con todos estos datos se generó una interpretación para el cultivo, el cual describe que la parcela requería encalado de forma preventiva, ya que el resultado de aluminio, calcio, nitrógeno y fósforo requerían un manejo adecuado para anticipar cualquier problema posterior a las cercanas precipitaciones pluviales. Se determinó teóricamente que la dosis adecuada de dolomita es 84,09 g/planta, para un porcentaje de saturación de aluminio deseado del 18%, por tal motivo se decidió utilizar tres tratamientos T1=testigo; T2=80g/planta; T3=120g/planta. Se determinó que el mejor tratamiento que alivia los posibles problemas que se pueden presentar en el suelo del cultivo fue el segundo tratamiento, aunque estadísticamente no existen diferencias notables en el crecimiento de la planta.

Descriptor: Acidez del suelo, dolomita, análisis de suelos en laboratorio, PRNT, Interpretación de resultados de análisis de suelos, crecimiento de la planta de café.

ABSTRACT

The present research work was carried out in the canton of Chijchipani of the Municipality of Caranavi of the department of La Paz, a region in which generally in the crops there are problems of soil degradation due to acidity. In this context, the research presents the objective of evaluating the change in soil acidity due to the action of dolomite (lime) and the improvement presented by the crop plant (red catuaí coffee), evaluated with an experimental analysis in the laboratory and statistically with a randomized block design (DBA), with three blocks and three treatments, making the interpretation based on the analysis of variance (ANVA) and Duncan's test at 5%. An initial analysis of the entire plot (1 sample) and a final analysis of the blocks (9 samples) were performed. When performing the initial analysis for the soil sample, the result was pH = 5.54; EC=42.36(μ S/cm); Silty loam texture; true density=2.5411(g/ml); OM=5.74%; exchangeable acidity=2.21 (meq/100g soil); Ca= 5.99 (meq/100g soil); Mg=2.14 (meq/100g soil); Na=0.0039 (meq/100g soil); K=0.044 (meq/100g soil); CEC=10.44 (meq/100g soil); N=0.86% and P=1.83. Likewise, as a result of the dolomite analysis, Ca=33.65% was obtained; Mg=2.80% and PRNT=90.20%. With all these data, an interpretation was generated for the crop, which describes that the plot required preventive liming, since the result of aluminum, calcium, nitrogen and phosphorus required proper management to anticipate any problem after the nearby rainfall. It was theoretically determined that the adequate dose of dolomite is 84.09 g/plant, for a desired aluminum saturation percentage of 18%, for this reason it was decided to use three treatments T1=control; T2=80g/plant; T3=120g/plant. It was determined that the best treatment that alleviates the possible problems that can occur in the soil of the crop was the second treatment, although statistically there are no notable differences in plant growth.

Descriptors: Soil acidity, dolomite, laboratory soil analysis, PRNT, Interpretation of soil analysis results, coffee plant growth.

1. INTRODUCCION

Los suelos son un recurso que muchas veces pasa desapercibido para la mayoría de nosotros. No tomamos en cuenta de que es el precursor y el medio de desarrollo básicamente de todos los alimentos vegetales. Se debe considerar que los suelos son un recurso natural finito que se debe cuidar, y también se deben prevenir diversos problemas que puede llegar a presentar, dependiendo de las condiciones geográficas, climáticas, tipos de cultivo, entre otras variables que pueden afectar a los suelos y a su equilibrio físico, químico y biológico.

La degradación del suelo se presenta de distintas maneras con problemas incidentes de acuerdo a la ubicación del mismo y también está directamente relacionado con la disposición que presenta. El uso de los suelos para la implementación de cultivos es una de las actividades más significativas para este recurso, pero este proceso puede degenerar los suelos dando como resultado en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para la población.

Los suelos de las regiones tropicales y subtropicales son naturalmente ácidos, característica que tiene por origen varios factores como las intensas precipitaciones pluviales, muy común en estas regiones donde el agua por hidrólisis o reacción con el CO_2 libera hidrógeno (H^+), el cual puede desplazar y reemplazar los escasos cationes básicos del coloide arcilloso como el Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+ , además del Al^{+3} estructural componente de las arcillas. (Lima, 2020)

Los niveles de acides presentes en estos lugares afectan al desarrollo de los cultivos, ante esta situación se ve la necesidad de incrementar el pH para obtener mejor desarrollo. Uno de los agentes utilizados para encalar es la dolomita natural. La dolomita es el carbonato doble de calcio y magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, que se puede utilizar para corregir el pH de los suelos, además de potenciar el desarrollo de los cultivos.

La producción y exportación del café en nuestro país es un tema que merece atención siendo uno de los principales productos genéricos que se comercializan en el mercado mundial, cuya producción se realiza por lo general en las zonas tropicales. El 96% de la producción de café en Bolivia se concentra en las provincias de Caranavi, Nor y Sud Yungas del departamento de La Paz, la especie que se produce es la Arábica, seguido

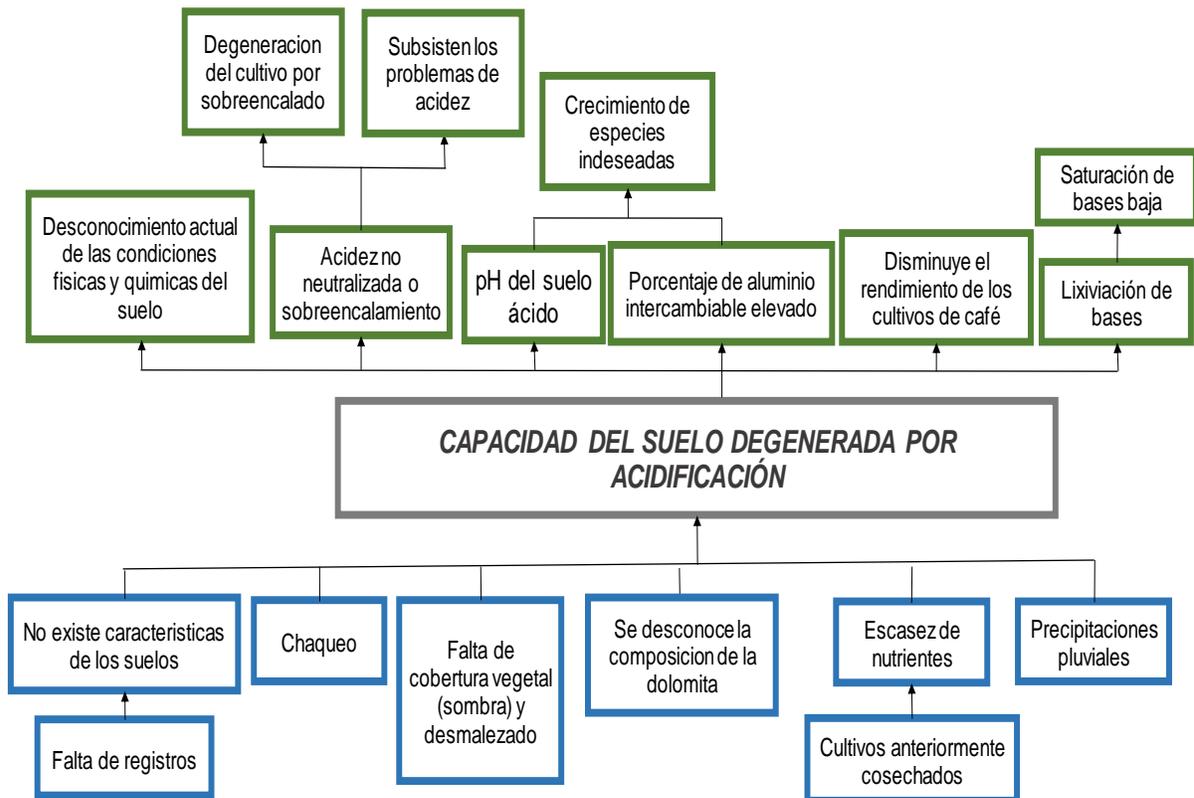
por Santa Cruz con un 3% y Cochabamba con un 1%, así lo manifiesta el MDRyT (2019).

Concentrándose la mayor cantidad de producción en el departamento de La Paz en la región de los Yungas, específicamente en el municipio de Caranavi, reconocida como el municipio cafetalero. Entre los cantones que se destacan por la producción de café se tiene a Chijchipani, el cual se caracteriza por un clima tropical dando las condiciones adecuadas para el óptimo desarrollo del cultivo de café. Uno de los problemas que generalmente se presenta en estos cultivos, es la degradación por acidez. La dolomita es uno de los agentes encalantes que se aplica a estos cultivos, que presentan un problema de acidez con un valor de pH menor a 5 y en aquellos suelos que se quiere potenciar la función de fotosíntesis.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Árbol de Problemas

Figura 1: Árbol de problemas.



Fuente: Elaboración propia.

1.2. Planteamiento del problema

La caficultura es muy importante para el municipio de Caranavi, siendo la producción de café una de las actividades económicas más importantes para los habitantes de ese sector. Los suelos en estas regiones tienden a ser ácidos, debido especialmente a las precipitaciones pluviales características de la región, dando como resultado la disminución del valor de pH y provocando la lixiviación de las bases intercambiables como ser calcio, magnesio, sodio y potasio.

El pH registrado en esta zona es ácido, lo que provoca que el porcentaje de aluminio intercambiable se incremente llegando a niveles tóxicos y perjudicando el desarrollo de los cultivos de café. Para incrementar el valor de pH se utilizan diversas enmiendas, entre ellas la dolomita.

En el cantón de Chijchipani no se encontraron registros del comportamiento de los suelos al realizar el encalado con dolomita o cualquier otra enmienda. El presente trabajo pretende modificar favorablemente las características del suelo con la aplicación de la dolomita.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar el cambio de acidez en el suelo por acción de la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), mejorando las condiciones para el cultivo de café catuaí rojo (*Coffea arabica L.*) en el cantón de Chijchipani del Municipio de Caranavi del departamento de La Paz.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las condiciones actuales de acidez del suelo.
- Determinar la dosis de dolomita adecuada para optimizar las características del suelo promoviendo el mejoramiento del cultivo de café.
- Evaluar el efecto de la dolomita en los parámetros físicos y químicos del suelo.
- Determinar la influencia de la dolomita en el crecimiento de la planta de café de la variedad catuaí rojo.

3. JUSTIFICACION

El pH de los suelos, en regiones tropicales y subtropicales es generalmente ácido, causa que impide el desarrollo óptimo de cultivos de café al incrementar la presencia de Al^{+3} con niveles que resultan tóxicos, perjudicando el desarrollo de la planta.

La parcela en estudio se encuentra en la comunidad Túpac Katari del cantón de Chijchipani, una región sub andina en el valle subtropical. En esta comunidad se registran precipitaciones pluviales intensas que genera una deficiencia de cationes básicos intercambiables.

En el cultivo no se utilizó con anterioridad, ningún fertilizante o algún agente que modifique las características químicas del suelo, por lo que se desconoce el impacto que tendría la dolomita en el terreno.

La dolomita es un compuesto que tiene la función de corregir el pH de los suelos ácidos por la presencia de Ca^{+2} , además de contener Mg^{+2} . La fórmula de la dolomita es $CaMg(CO_3)_2$ y al incorporarse al suelo potencia la función fotosintética de la planta como componente esencial para la clorofila.

4. FUNDAMENTO TEORICO

4.1. El cultivo de café

4.1.1. Origen

Cuba (2006) indica que la especie de café más cultivado en el mundo es la *Coffea arabica L.* que originariamente crece en las mesetas de Etiopía siendo su centro de origen. Paso a Yemen (Asia occidental), en el transcurso de los siglos XIII y XIV, posteriormente pasó a Guayanas, Antillas y Sumatra, Fue introducida en Brasil en 1727 y a fines del siglo XVIII se encontraba distribuida en toda América Central y México. Siendo la variedad *Typica* de la *Coffea arabica L.*, la única planta de café cultivada en América y en Antillas hasta la década de los 60 del pasado siglo (Citado por Condori, 2020).

4.1.2. Importancia del café en Bolivia

En Bolivia la caficultura se realiza en diferentes departamentos del país, pero el departamento de La Paz, concretamente la zona de los Yungas, se constituye en el

centro cafetalero del país. Como se puede ver en la siguiente tabla (Tabla 1), en las provincias de Caranavi, Nor y Sud Yungas, Larecaja, Franz Tamayo, Inquisivi y Murillo se encuentra aproximadamente el 95 % de la producción nacional y el restante 5 por ciento se distribuye entre cinco departamentos. (IBCE, 2007)

Tabla 1: Regiones productoras de café en Bolivia.

Departamento	Producción	Provincias	Localidad
La Paz	91,05 %	Caranavi, Nor Yungas, Sud Yungas, Inquisivi, Franz Tamayo, Larecaja, Iturralde.	Alto Beni, Coroico, Caranavi, Taipiplaya, Irupana, Palos Blancos, Apolo, Guanay, Cajuata.
Santa Cruz	6, 24 %	San Ignacio de Velasco e Ichilo	San Ignacio Y Buena Vista
Cochabamba	2,02 %	Chapare, Carrasco y Ayopaya.	Culumí, Chimore, Ayopaya
Tarija	0,5 %	Arce	Bermejo
Beni	0,61 %	José Ballivian, Vaca Diez, Ilnes, Moxos	San Borja, Guayaramerin, Riberalta
Pando	0,3 %	Nicolás Suarez	Santa Cruz, Costa Rica

Fuente: MDRyT (2019).

La producción de café en Caranavi es una de las actividades económicas más importantes del lugar. Caranavi está ubicado al noreste del Departamento de La Paz, en la parte de la zona subandina, en el sector conocido como faja de Yungas Alto, cuyo referente natural es la Cordillera Oriental o Real, que atraviesa Bolivia desde el norte hasta el sudeste, regulando el clima de las fajas altitudinales. Por la ubicación y las condiciones climáticas del municipio se presentan elevados volúmenes de producción, los cuales de acuerdo a su importancia son: cítricos (45.63%), bananos (18.9%), café (16.3%), arroz (7.5%), yuca (5.1%) y maíz (0.66%). Sin embargo, los mayores rendimientos se encuentran en el café y en el arroz. El mayor producto dado por su riqueza, es la Caficultura que le ha conllevado a la denominación por Ley la “Capital Cafetalera de Bolivia”. (PTDI - GAMC, 2020)

4.1.3. Clasificación taxonómica

La taxonómica del cafeto de acuerdo a la investigación de Pajsi (2017) es la siguiente:

Reino:	Vegetal
Sub reino:	Embryophita
División:	Anthophyta
Clase:	Mangoliopsida
Sub clase:	Asteridae
Orden:	Rubiales
Familia:	Rubiaceae
Género:	Coffea
Especie:	Arábica
Nombre científico:	Coffea arábica L.
Variedad:	Catuai rojo

4.1.4. Clasificación botánica

4.1.4.1. La semilla

De acuerdo a Rodas (2010) está constituida por el endospermo y el embrión, el primero coriáceo de color verdoso o amarillento, las células del endospermo contienen almidón, aceites, azúcares alcaloides como cafeína y otras sustancias en su parte basal se hallan el embrión de 2 a 5 mm de largo. El contenido promedio de cafeína 1,015 %, de aceites y grasas de 10,85 % factor determinante del aroma y sólidos solubles compuestos por hidratos de carbono y proteínas en un 28,6 % (Citado por Pajsi, 2017).

4.1.4.2. La raíz

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, (2010) asegura que el cafeto tiene una raíz principal que penetra verticalmente en suelos hasta profundidades de 50 cm, de esta raíz salen otras que se extienden horizontalmente y sirven de soporte a las raíces delgadas o absorbentes llamadas también raicillas que son bastante superficiales y se encargan de tomar el agua y los nutrientes minerales. En los primeros 10 cm de profundidad del suelo se encuentran un poco más de la mitad de estas raicillas y el 86 % en los primeros 30 cm (Citado por Condori, 2020).

4.1.4.3. El tallo

Sotomayor, (1993) indica que el tallo de las plantas de café normalmente es unicaule, aunque en ciertas ocasiones presenta tallos múltiples, el cafeto es un pequeño árbol, caracterizado por el dimorfismo de ejes; que consiste de un eje vertical u ortotrópico del que salen ejes laterales o plagiotrópicos, el tallo forma nudos y entrenudos, en los primeros 9 a 11 aparecen hojas opuestas en filotaxia de 2/5; en cada uno hay de 1 a 2 estípulas, opuestas a las hojas aparecen yemas vegetativas en las axilas, donde se desarrollan ramas laterales, adquiriendo la planta forma piramidal (Citado por Pajsi, 2017).

4.1.4.4. Hojas

Según indica Sotomayor, (1993) las primeras hojas que se forman en el cafeto son los cotiledones, las 9 a 11 hojas que se forman a continuación son elípticas y de superficie ondulada, las que nacen en las ramas primarias, secundarias o terciarias, aparecen en un mismo plano o en pares opuestos, cada una con dos estípulas aguadas, la lámina foliar mide a veces de 12 a 24 cm de longitud y de 5 a 12 cm de ancho de forma elíptica o lanceolada (Citado por Pajsi, 2017).

4.1.4.5. Flores

De acuerdo a CENICAFE (1988) y Barrientos (2000) las flores se desarrollan en las axilas de las hojas sobre glomérulos (tallo corto) en grupos de 3 a 5 flores, originalmente colocadas en línea recta entre la rama y la hoja, la flor del cafeto tiene de base un receptáculo carnoso, el cáliz consiste de cinco dientes finos e irregulares a manera de un reborde verde y continuo, la corola tubular en la base se abre arriba en cinco pétalos, con cinco estambres insertos en el tubo de la corola localizados en las uniones de los pétalos y en posición continua, de ovario ínfero con 2 óvulos con estigma bifido, la flor se abre por la mañana y tiene una vida efímera comúnmente de solo 24 horas, a cuyo término se seca la corola y se desprende (Citado por Condori, 2020).

4.1.4.6. Frutos

De acuerdo con Lizarro, (1997) el fruto es una drupa, comúnmente llamada cereza, de forma subglobosa, de color rojo o amarillo a la madurez y que alcanza, según las

variedades, de 8 a 15 mm de alto. Cada fruto está constituido por un exocarpio rojo o amarillo; un mesocarpio carnudo, de color blanco amarillento (pulpa) y dos semillas (granos) reunidos por su faz plana pero verdoso conteniendo de 1 a 2 % de cafeína. Cada grano está protegido por dos envolturas, la primera o endocarpio que es delgada y de textura esclerosa (pergamino), la segunda el perisperma o tegumento seminal que es una tela finísima (película plateada) (Citado por Pajsi, 2017).

4.1.5. Fases fenológicas

Según el Programa de Identificación Científica (2014) las fases fenológicas de un cultivo de café son las siguientes:

Etapa I: Esta etapa cubre desde la floración hasta 50 días aproximadamente, es una etapa de crecimiento lento.

Etapa II: Transcurre entre los 50 y 120 días en promedio, el fruto crece de manera acelerada y adquiere su tamaño final, y la semilla tiene consistencia gelatinosa.

Etapa III: Transcurre entre los 120 y 180 días, la semilla completa su desarrollo, adquiere consistencia sólida y gana peso.

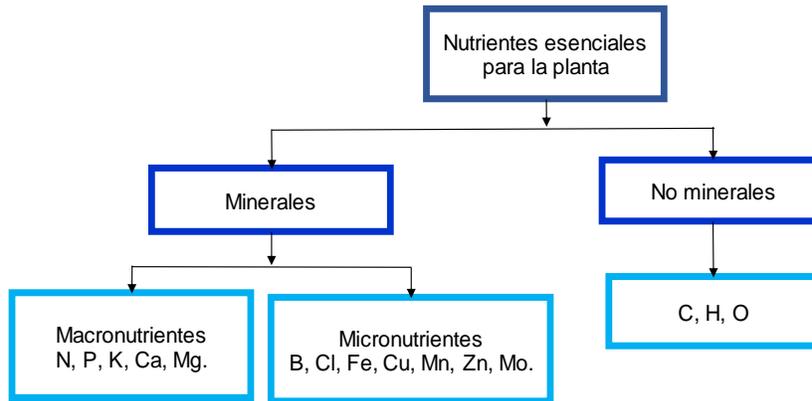
Etapa IV: Transcurre entre los 180 y los 224 días, el fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar.

Las etapas II y III son las etapas de mayor demanda de agua y de nutrientes del fruto, y es donde se debe garantizar la mayor disponibilidad de ambos factores.

4.1.6. Elementos esenciales para el cultivo de café

Todas las plantas superiores, entre ellas el café, requieren 16 o más elementos que se consideran esenciales para su crecimiento. Estos de acuerdo a su origen pueden clasificarse en minerales (aquellos que se encuentran principalmente en el suelo y son absorbidos por las raíces de las plantas en sus formas inorgánicas) y no minerales los que proceden esencialmente de la atmósfera y del agua), como se muestra en la Figura 2. De acuerdo con la cantidad requerida, los elementos minerales se clasifican en mayores o macronutrientes y menores o micronutrientes. (Cenicafé, 2008)

Figura 2: Clasificación de los nutrientes esenciales para la planta, de acuerdo a su origen



Fuente: Cenicafé (2008)

4.2. El suelo

Es la capa superior de la superficie sólida del planeta, formada por meteorización de las rocas, en la que están o pueden estar enraizadas las plantas y que constituye un medio ecológico particular para cierto tipo de seres vivos. El suelo resulta de la descomposición de la roca madre, por factores climáticos y la acción de los seres vivos. La descomposición de la roca madre puede hacerse por disgregación, factores físicos y mecánicos, por alteración, o descomposición química. En este proceso se forman unos elementos muy pequeños que conforman el suelo, los coloides, iones, y por su origen el suelo tendrá determinadas características. El suelo está compuesto de partículas de distintos tamaños, sustancias de origen orgánico, aire, agua y organismos. Es esta condición de composición organomineral lo que le permite ser un sustrato de multitud de especies vegetales y animales. (Álvarez et al., 2004)

4.2.1. Funciones del suelo

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios al ecosistema, entre ellos y a manera de ejemplo, el relacionado con su participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc., que continuamente y por efecto de la energía disponible, pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta. No obstante, lo más conocido, es que el suelo es el asiento natural para la producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad mundial (CONABIO, 2016; Silva y Correa, 2009; OBIO, 2016; Montanarella, 2015) (Citado por Lima, 2020).

Según Alvarez et al. (2004) se reconoce que el suelo cumple 4 funciones vitales para el planeta:

- Sostener la actividad, diversidad y productividad biológica.
- Regular y distribuir el agua y flujo de solutos.
- Filtrar, drenar, inmovilizar y desintoxicar materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo desechos municipales de la industria.
- Almacenar y posibilitar el ciclo de nutrientes y otros elementos.

4.2.2. Propiedades físicas del suelo y su impacto en los cultivos

4.2.2.1. Conductividad eléctrica (CE)

La facilidad con que la planta puede aprovechar el agua en el suelo depende no solamente del contenido de agua en este, sino también de la concentración de sales disueltas en la solución del suelo. La presión osmótica de la solución aumenta con un incremento del contenido de sales e incrementa la dificultad que tiene la planta para aprovechar el agua. La tolerancia de los cultivos a la salinidad está relacionada con la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo. (McKean, 1993)

4.2.2.2. Densidad (ρ)

Mediante la determinación de la densidad se puede obtener la porosidad total del suelo. Se refiere al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas. (FAO & GTIS, 2015)

4.2.2.3. Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. (FAO & GTIS, 2015)

Porta et al., (1994) hace énfasis en el interés de conocer este parámetro ya que permite inferir en otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo: Capacidad de retención de agua disponible y de suministro para las plantas y la factibilidad de circulación del mismo (velocidad de entrada y salida); Facilidad de laboreo, el riesgo de formación de costra superficial y el riesgo a erosión ya sea hídrica o eólica; Capacidad de almacenar nutrientes y admitir aguas residuales y otros (Citado por Zapana, 2016).

4.2.3. Propiedades químicas del suelo y su impacto en los cultivos

4.2.3.1. pH

McKean (1993) indica que el pH del suelo es uno de los parámetros que mejor refleja las propiedades químicas de cualquier suelo. El pH es un factor que determina la disponibilidad de muchos de los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas. Aunque no sea posible deducir la acidez total del suelo midiendo el pH, según Thomas (1957) hay tres rangos de pH que son muy informativos sobre la química del suelo:

Tabla 2: Rangos de pH en el suelo.

Rango de pH	Interpretación
pH < 4	Indica la presencia de ácidos libres. generalmente resultantes de la oxidación de sulfuro.
pH < 5	Indica la presencia de aluminio intercambiable.
pH entre 7,8 y 8,2	Indica un contenido elevado de CaCO ₃ .

Fuente: McKean (1993).

4.2.3.2. Materia orgánica (M.O.)

La M.O. del suelo es definida como la fracción del suelo que Incluye los residuos de plantas y animales, macro como micro bióticos en todas las etapas de descomposición, incluyendo el humus del suelo que es bastante resistente (SSSA, 1979). La M.O. Influye mucho en las propiedades químicas y físicas del suelo, por lo tanto, es importante tener una idea del contenido de M.O. en el suelo. (McKean, 1993)

La M.O. tiene un efecto positivo sobre la estructura del suelo, mejorando su permeabilidad, su capacidad de almacenar agua y el laboreo, en consecuencia, reduce la erosión. Aporta elementos nutritivos, constituye junto a la arcilla el complejo de cambio y facilita la absorción de los nutrientes. Favorece la proliferación de microorganismos aerobios a los que proporciona carbono y nitrógeno, cuando la materia orgánica está poco descompuesta. Favorece, además, la respiración de las raíces y la germinación de las semillas. (Laserna & Laserna, s. f.)

4.2.3.3. Nitrógeno (N)

Aprovechado sólo como nitrito, nitrato y amonio. Constituyente básico de las proteínas, la clorofila y las enzimas. Este elemento disminuye a medida que aumenta la profundidad. La acumulación de nitrógeno en los primeros decímetros de suelo es el resultado de la actividad biológica. En efecto; por un lado, a través del proceso de la humificación se producen componentes nitrogenados que son incorporados al suelo por microorganismos y, por otro lado, las raíces finas al morir, se humidifican en el suelo e incorporan el nitrógeno. En las regiones volcánicas como las de nuestro país, se tiene un rejuvenecimiento de los suelos por las cenizas de las erupciones; la formación de complejos organominerales protege a las sustancias nitrogenadas de la mineralización. (Teuscher & Adler, 1984).

4.2.3.4. Fosforo (P)

El fosforo se encuentra en el suelo en forma orgánica e Inorgánica. Se asocia con la materia orgánica, las arcillas y los compuestos de Al, Fe y Ca. Para ser aprovechable para la planta el fosforo tiene que estar en la solución del suelo, estos iones presentes dependen del pH del suelo, siendo los dos más comunes el H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . El fosforo se somete a varias transformaciones en el suelo las cuales hacen que sea menos o más disponible para la planta. El fosforo total puede ser alto, pero la concentración disponible muy baja debido a las reacciones en el suelo, los iones de fosforo pueden ser adsorbidos por los componentes del suelo o precipitados en productos poco solubles. Su concentración en la solución del suelo depende del suministro por la reacción de desorción de fosforo desde los componentes del suelo o la mineralización del fosforo orgánico. En algunos suelos la desorción es muy lenta y aparece una deficiencia de fosforo en la planta. (McKean, 1993)

4.2.3.5. Bases intercambiables (BI)

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg): El calcio y el magnesio existen en la solución del suelo, ligados en el complejo intercambiable y en algunos minerales. La forma intercambiable es la más importante para la planta. Normalmente el calcio es el ion más abundante en el suelo, pero en los suelos ácidos se lixivia y el aluminio lo reemplaza. Las propiedades del suelo que más afectan la disponibilidad de calcio para la planta son el material parental, el pH, la capacidad de Intercambio catiónico (CIC) y la relación entre el calcio y los otros cationes. La disponibilidad del magnesio también es afectada por la textura del suelo. Una relación entre calcio y magnesio de más de 5:1 puede resultar en una deficiencia de magnesio; la normal es 4:1. Si la relación entre magnesio y potasio es menor de 1:2 hay posibilidad de una deficiencia de magnesio. En suelos ácidos, una concentración de menos de 4 meq Ca/100 g puede ser deficiente; más de 10 meq /100 g es alta. Una baja concentración de magnesio es menos de 0.5 meq /100 g y más de 4 meq /100 g es alta. (McKean, 1993)

Potasio (K): Según Bornemiza et al. (1987) el potasio que contiene la solución del suelo donde se produce la absorción de la planta es una fracción muy pequeña del potasio total. En el suelo, el Potasio se encuentra en diferentes fracciones, las cuales presentan un equilibrio químico. Las formas en que se encuentra el potasio en el suelo son: potasio estructural; potasio en los minerales secundarios; potasio adsorbido, quelado o acomplejado; potasio intercambiable; potasio como parte de la solución del suelo. (Citado por Álvarez et al., 2004).

Las formas más disponibles para la planta son el potasio soluble y el potasio intercambiable el cual está asociado con la materia orgánica, los sesquióxidos y algunas arcillas. Estas dos formas están en un equilibrio dinámico en el suelo. En suelos tropicales una concentración de potasio de 0,2 meq /100 g es bajo, mientras una de 0.6 meq /100 g es alta. La determinación de potasio no indica la capacidad del suelo para liberar a largo plazo el potasio fijado aprovechable por la planta. (McKean, 1993)

Sodio (Na): El contenido de sodio en el suelo puede variar desde cantidades pequeñas hasta una porción grande de la capacidad Intercambiable del suelo

dependiendo de las condiciones del medio ambiente. En suelos sódicos/salinos se encuentra una alta concentración de sodio en la solución del suelo. Una concentración de más de 1 meq /100 g indica un suelo sódico y puede causar problemas físicos en el suelo. (McKean, 1993)

4.2.3.6. Acidez intercambiable (Al+H)

La acidez intercambiable de un suelo con $\text{pH} < 5,5$ es una estimación de la cantidad de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) Intercambiables en el suelo. Thomas (1982) determinó que la acidez en los suelos con un pH mayor a 5,5 proviene del aluminio hidrolizado y no intercambiable; los suelos con un pH menor de 5,5 deben su acidez especialmente porque los iones hidrogeno que provienen de la hidrólisis del aluminio intercambiable; y los suelos con un pH menor a 4 deben su acidez a los iones de hidrogeno intercambiable. (McKean, 1993)

Aluminio (Al): Según Bornemiza et al. (1987) la presencia de Aluminio compite con el Calcio y Magnesio en el suelo por los sitios de intercambio; y por consiguiente la toxicidad de Aluminio se puede disminuir mediante la aplicación de Calcio y Magnesio. El efecto más determinante de acidez en suelos agrícolas indudablemente que es la solubilidad de Aluminio, elemento altamente tóxico para las plantas en general. El factor más perjudicial para las plantas en suelos fuertemente ácidos es la toxicidad del Al, particularmente cuando el pH es inferior a 5.0 (Citado por Álvarez et al., 2004).

La concentración de Al^{+3} en la solución del suelo a pH menor de 5,0 se encuentra en el rango de 10 - 100 μM , e incluso, en suelos minerales de ecosistemas forestales, la concentración de Al^{+3} soluble puede alcanzar valores cercanos a 1.000 μM ; el aluminio se reporta como el factor más limitante de la producción agrícola en suelos ácidos, los cuales comprenden alrededor del 40% de la superficie cultivable en el mundo (Matzner y Prenzel, 1992; Ma, 2000) (Citado por Lima, 2020).

4.2.3.7. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Los cationes intercambiables son los que se pueden cambiar por los cationes de una solución salina (por ejemplo, KCl) cuando se le agrega al suelo. Los cationes intercambiables incluyen Ca, Mg, K, Na (los cationes básicos) y en los suelos ácidos también Incluyen Al e H (la acidez intercambiable). La concentración de cada catión

intercambiable es una indicación de la fertilidad del suelo y muestra el balance de los cationes en el suelo el cual es muy importante en la nutrición de las plantas. A veces la medición de cada catión es mucho más válida para indicar la fertilidad del suelo que la medición de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Sin embargo, la CIC se evalúa para valorar la fertilidad potencial del suelo, siendo una medida de la cantidad de cationes intercambiables los cuales están neutralizando la carga negativa del suelo. (McKean, 1993)

4.2.4. Suelos ácidos

La acidificación del suelo es la disminución del pH del suelo debido a la acumulación de iones hidrógeno y aluminio en el suelo, y la pérdida asociada de cationes básicos tales como el Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} y K^{+} del suelo debido a la lixiviación o remoción del producto. (FAO & GTIS, 2015)

En los suelos ácidos, el aluminio puede volverse muy soluble y tóxico, además reduce la capacidad de la planta para absorber fósforo, calcio, magnesio y nitrógeno. Especialmente en los suelos ácidos, el fósforo no está disponible para las plantas. Si el boro, el cobre y el zinc están presentes en el suelo, pueden presentar toxicidad a bajos valores de pH. El pH del suelo tiene relativamente poco efecto sobre el nitrógeno. (CIMMYT, s. f.)

4.2.4.1. Factores que provocan la acidificación del suelo

Según Encina (2016) la acidificación del suelo es un proceso químico, donde existen diferentes factores, tanto naturales como antrópicos, que condicionan la magnitud e intensidad del proceso de acidificación y, por ende, la aparición del aluminio en la solución del suelo, entre esos factores están:

- **Clima:** La lluvia es la principal causa natural de la acidificación, favoreciendo el lavado o lixiviación de los elementos básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}), siendo reemplazados por el H^{+} y Al^{+3} .
- **Laboreo de suelos:** Es propio de una agricultura de carácter intensivo, favoreciendo considerablemente la pérdida de los elementos básicos, al dejar temporalmente el suelo sin una cubierta vegetal protectora.

- **Uso intensivo de fertilizantes:** Los fertilizantes amoniacales y amidas son de reacción ácida. La intensidad de la acidificación está regulada por la cantidad de fertilizantes aplicados y por el manejo del suelo.
- **Materia orgánica:** A pesar de ser menos peligroso, el humus contiene grupos activos que se comportan como ácidos débiles y liberan iones de hidrógeno (Citado por Lima, 2020).

4.2.4.2. Tipos de acidez en el suelo

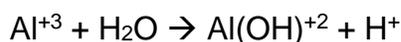
Espinoza & Molina (1999) establecieron que la acidez de los suelos se puede clasificar de la siguiente forma:

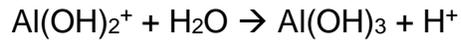
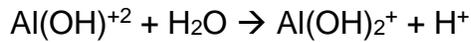
- **Acidez activa:** Hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.
- **Acidez intercambiable:** Hidrógeno y aluminio intercambiables (H^+ y Al^{+3}) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas.
- **Acidez no intercambiable:** Hidrógeno en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.
- **Acidez potencial:** Acidez intercambiable + acidez no intercambiable.

4.2.4.3. El aluminio intercambiable (Al^{+3})

Encina (2016) indica que en aquellos suelos con un pH menor a 4.5, el aluminio se solubiliza y se convierte en su catión trivalente (Al^{+3}), incrementando su concentración a niveles tóxicos para las plantas. La acidificación es una de las causas más importantes de degradación de los suelos agrícolas a nivel mundial (Citado por Lima, 2020).

Es reconocido ampliamente el papel del aluminio intercambiable (Al^{+3}) como uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo. Los iones (Al^{+3}) desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos. La hidrólisis de las formas monoméricas se ilustra en las siguientes reacciones:





Cada una de estas reacciones libera H^+ y contribuye a la acidez del suelo. Este incremento en acidez promueve la presencia de más Al^{+3} listo para reaccionar nuevamente, el Al^{+3} aparece en la solución suelo a pH 5,3 y que arriba de este valor de pH se inicia la formación de Al(OH)_3 (gibbsite) que se precipita, eliminando el Al^{+3} intercambiable de la solución suelo (Espinoza & Molina, 1999).

El Al^{+3} compite con el Ca y Mg por ocupar los sitios de enlace en la membrana celular, esta condición disminuye la absorción del Ca y Mg. La inhibición de la absorción estas dos bases intercambiables por la presencia de Al^{+3} se debe a diferentes motivos. En el caso del Ca se debe a que el Al^{+3} bloquea los canales de la membrana plasmática, mientras que la inhibición de la absorción del Mg se debe al bloqueo de la actividad de los transportadores de proteínas (Calva, 2016).

4.2.4.4. Absorción del aluminio por la planta

Existen dos formas principales en las que el aluminio biodisponible (Al^{+3}) pueda influir negativamente sobre el crecimiento de la planta: inhibición de la absorción de la planta por los nutrimentos esenciales calcio y magnesio, ser tóxico a las raíces de las plantas, inhibición de la división celular en raíces, y acumulación en tejidos vegetales. El Ca y Mg son necesarios para el crecimiento de las plantas, y las raíces de las plantas acumulan las formas iónicas de estos nutrimentos (Ca^{+2} y Mg^{+2}) a través de transportadores de iones para la absorción, provocando deficiencias de Ca y/o Mg en las plantas. Estas deficiencias no se presentan si las concentraciones de Al^{+3} fueran menores. El Al^{+3} puede causar deficiencias de Ca y/o Mg al aumentar la cantidad de Ca^{+2} y Mg^{+2} lixiviados de los suelos. Cuando el Al^{+3} se disuelve en un pH bajo, el suelo tiene una capacidad menor de retener Ca^{+2} y Mg^{+2} (el suelo tiene una capacidad menor de intercambio catiónico o CIC), de manera que los iones de estos nutrimentos tienen una mayor tendencia a lixiviarse del suelo. Cuando las concentraciones de Al^{+3} en el agua del suelo aumentan como resultado de condiciones de pH bajo, el Al^{+3} competirá con el Ca^{+2} y Mg^{+2} por sitios de unión, resultando en una mayor lixiviación de estos iones del suelo. La magnitud del problema del Al^{+3} en los suelos a menudo se expresa

como la proporción de Ca^{+2} a Al^{+3} o Mg^{+2} a Al^{+3} en la solución del suelo, estas proporciones predicen el riesgo de deficiencia de Ca^{+2} o Mg^{+2} inducida por Al^{+3} que solo la concentración de Al^{+3} . (Aguirre, 2001; Castellanos et al., 2000) (Citado por Lima, 2020).

4.2.4.5. Síntomas de estrés por aluminio en plantas

La concentración de Al^{+3} es más alta en las raíces que en los tejidos aéreos. El primer síntoma perceptible cuando se presenta toxicidad por Al^{+3} es la disminución del crecimiento radicular en longitud y un incremento en el diámetro de los ápices radiculares. Las raíces afectadas por Al^{+3} exploran un volumen muy limitado del suelo y así se reduce su capacidad para tomar los nutrientes y el agua. El Al^{+3} interfiere con la toma, el transporte y utilización de los elementos nutritivos. (Casierra & Aguilar, 2007)

Valencia et al. (1983) observaron que la exposición de *Coffea arabica* a aluminio inducía crecimiento limitado de la parte aérea y ocurrencia de raíces gruesas, cortas y carentes de raicillas. A nivel microscópico observaron daños en los tejidos radicales, entre los cuales fueron notorias las alteraciones en la morfología y los indicios de alteración o inhibición de la división celular. Management (2014) estableció en su investigación que el exceso de Al^{+3} en el suelo puede conducir a otros problemas nutricionales como: color pálido o descolorido, crecimiento marchito o raquítrico, tallos finos o débiles y manchas necróticas (Citado por Lima, 2020).

4.2.4.6. Corrección de la toxicidad por aluminio

Para corregir la toxicidad por aluminio, es primordial identificar el nivel de acidez y la cantidad de aluminio soluble en el suelo agrícola; esto permitirá aplicar prácticas pertinentes y efectivas de manejo y conservación de los suelos, dentro de un sistema sustentable (Lima, 2020).

El Instituto Colombiano Agropecuario (1992) ha generalizado tres criterios para considerar al aluminio como un problema en el suelo: (1) cuando se presentan en el suelo, valores superiores a 2 meq de aluminio intercambiable; (2) cuando el porcentaje de saturación de aluminio, en relación con los cationes intercambiables, es mayor que 25; (3) si la relación $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ es menor o igual que uno. En cualquiera de estos

casos es necesaria la implementación de algún correctivo con el fin de reducir el efecto tóxico del aluminio para las plantas (Citado por Casierra & Aguilar, 2007).

Cumming y Weinstein (1990) afirman que mediante la aplicación de cal al suelo, es posible lograr la reducción de los efectos tóxicos del aluminio, dado que los carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio neutralizan los iones H^+ en la solución del suelo, a través de los iones OH^- , cuando la cal reacciona con el agua del suelo ($CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{+2} + HCO_3^- + OH^-$). La cal incrementa el pH del suelo al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Además, el incremento del pH del suelo induce la precipitación del aluminio, como $Al(OH)_3$, que es un compuesto insoluble (Citado por Casierra & Aguilar, 2007).

4.3. El encalado

El encalado consiste en la aplicación de materiales básicos al suelo (enmiendas calcáreas) que neutralicen la acidez. Los materiales que se utilizan son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Debido a su diferente naturaleza química los productos encalantes presentan una capacidad variable de neutralización. (Bernier & Alfaro, 2006)

De acuerdo con Toledo (2016) el encalado permite elevar el pH del suelo debido a que el calcio, presente en la cal ($CaCO_3$), desplaza el aluminio e hidrógeno presentes en los coloides, los que, una vez desplazados a la solución del suelo, reaccionan con el carbonato para formar compuestos lixiviables y no dañinos a las plantas. (Lima, 2020)

Bernier y Alfaro (2006) indican que las siguientes reacciones se llevan a cabo al aplicar la cal en los suelos ácidos:



4.3.1. Efecto de la cal en suelos ácidos

Las cantidades crecientes de aluminio generan suelos fuertemente ácidos ($\text{pH} < 5.5$), para elevar el pH de 4.5 a 5.5 en los 15 - 20 cm superiores del suelo se precisan entre 1.5 a 2 t/ha de CaCO_3 en suelos arenosos y francos, respectivamente. El principal causante de la acidez y el elemento a neutralizar es el aluminio intercambiable. Una de las fórmulas más conocidas y sencillas para calcular el CaCO_3 a incorporar al suelo es la propuesta por Kamprath (1970) y discutido por McLean (1982), incorporando tantas toneladas de CaCO_3 por hectárea como aluminio intercambiable en cmol/Kg se detecte en el suelo. El objetivo fue conocer las relaciones existentes entre el pH y el aluminio intercambiable del suelo, utilizando materiales encalantes con un Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT) de 60%, en macetas de 5 kg de suelo fuertemente ácido. Luego del encalado se midió el pH y Al^{+3} intercambiable. La dosis de 1 t/ha no mejoró el pH ni redujo el Al^{+3} intercambiable. En el otro extremo, 3 t/ha de hidróxido de calcio permitió elevar el pH y reducir el Al^{+3} intercambiable a menos de 0.2 cmol/kg . La producción de materia verde creciente aumento progresivamente, aplicando dosis de cal igual o mayor a 2 t/ha. Concluyendo, multiplicar el Al^{+3} por un factor de tres en lugar de dos propuesto por los autores del método Kamprath, la dosis elevada garantiza la neutralización del Al^{+3} intercambiable y compensación de la acidificación anual producida por la adición de materia orgánica o fertilizantes al suelo. La sustitución total de la caliza agrícola por caliza magnesiana no resulta adecuada. (Rodríguez & Lema, 2006)

Ruiz (2011) realizó un estudio sobre el efecto de la dolomita en las propiedades físicas y químicas del suelo en el cultivo de cacao bajo condiciones de acidez. Se empleó el Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), con 5 tratamientos y 3 repeticiones. Los tratamientos fueron; T0 = 0 t/ha, T1 = 0.356 t/ha, T2 = 0.713 t/ha, T3 = 1.189 t/ha y el T4 = 1.545 t/ha. El efecto de la dolomita fue significativo entre tratamientos en las propiedades físicas como la densidad aparente y porcentaje de porosidad, el mejor efecto se consiguió con el T4. El análisis químico muestra un mejoramiento del pH pasando de un nivel extremadamente ácido a fuertemente ácido; la materia orgánica mejoro de un nivel bajo a alto; el fósforo de un nivel bajo a normal, el potasio se mantuvo en un nivel bajo. El T4 tuvo su mayor efecto en la disminución

de aluminio e hidrógeno en el suelo, asimismo, logró efectos positivos en la altura de la planta y número de hojas del cultivo del cacao. (Lima, 2020)

4.3.2. Criterio de encalado

El pH, determinación rutinaria en el análisis de suelos, es un buen indicador de la acidez, sin embargo, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para llegar al rango de pH requerido en el sistema de producción que se está utilizando. El criterio combinado es una fórmula modificada que combina los criterios prácticos de los criterios de Cochrane, Salinas y Sánchez (1980) y el criterio de Van Raij (1991). Se expresa en términos de % de saturación de acidez y se incluye el factor f de calidad del material encalante. Es el más recomendado para realizar el cálculo de material encalante. (Rodríguez & Lema, 2006)

$$\text{CaCO} \left(\frac{\text{t}}{\text{ha}} \right) = 1,5 \frac{(\text{Al} - \text{PRS})(\text{CIC})}{100} * f$$

Dónde:

Al = % de saturación del aluminio actual

PRS = % de saturación de aluminio deseado

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónica

f = factor de calidad del material encalante. (100/PRNT)

4.3.3. Calidad del material encalante

Según Espinoza & Molina (1999) uno de los aspectos más importantes al considerar la eficiencia agronómica es la calidad de los materiales del encalado. La calidad se fundamenta en los siguientes factores:

Pureza química del material: La capacidad de neutralizar la acidez del suelo depende de la composición química y pureza del material. Para determinar la pureza se utiliza el criterio del equivalente químico (EQ) que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular. El EQ se define como la capacidad del material para neutralizar la acidez, comparado con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, al cual se le asigna un valor de 100%.

Tamaño de partícula: La fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción. A medida que se reduce el tamaño de la partícula de cualquier

material de encalado se aumenta el área o superficie de contacto. Un m² de cal sólida solo tiene 6 m² de superficie. Esa misma cantidad molida y cernida en un tamiz de malla 100, tiene 60.000 m² de área superficial. Entre más superficie específica tenga el material, más rápido reacciona la cal en el suelo.

Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT): Para valorar en forma conjunta la pureza química y la fineza de los materiales de encalado se utiliza el Índice de Eficiencia conocido también como PRNT. Este parámetro se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide entre 100.

4.3.4. Tipos de material encalante y su composición

Tabla 3: Tipos de material encalante y su composición.

Material Encalante	CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	
					Total	Soluble
Cal agrícola	70		40			
Cal viva	Mín. 70		Mín. 40			
Cal apagada	Mín. 70		Mín. 40			
Dolomita	55	30 - 40	30	15 - 20		
Oxido de magnesio				88		
Dolfos	55	26	30	13	5	
Roca fosfórica	Mín. 57		32 - 40		24 - 30	3
Escorias Thomas o calfos	Mín. 70		50	1,5	12	10

Fuente: Cenicafé (2008)

4.3.5. La dolomita

De acuerdo con Espinoza & Molina (1999) el carbonato doble de calcio y magnesio CaMg(CO₃)₂ se denomina dolomita. El material puro contiene 21,6 % de Ca y 13,1 % de Mg. Aunque la dolomita reacciona más lento en el suelo que la calcita, tiene la ventaja de que suministra Mg, elemento con frecuencia deficiente en suelos ácidos. Existen otros materiales de contenidos menores de Mg que se usan frecuentemente para encalar el suelo. De acuerdo con su contenido de Mg, los materiales de encalado se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 4: Clasificación de cales que contienen magnesio.

Tipo de cal	Mg (%)	MgO (%)	MgCO₃ (%)
Calcítica	< 3	< 5	< 10
Magnésiana	3 – 7	5 – 12	10 - 25
Dolomítica	> 7	> 12	> 25

Fuente: Espinoza & Molina (1999).

La dolomita es más que una simple variante de caliza, contiene alrededor de 70% de calcio y 21% de magnesio, en su forma más pura. Normalmente se presenta en cristales romboédricos y por lo general estos cristales son de hábito deformado, muy aplastados, curvos en forma de silla de montar o en formas masivas, compactas o bien en forma de pequeñas geodas (en dolomías). A menudo se encuentra como masas granulares. Como impurezas puede contener hierro y manganeso. Su color varía entre blanco, gris rosado, rojizo, negro, a veces con matices amarillento, parduzco o verdusco, predominando el incoloro o blanco grisáceo. Presenta un aspecto vítreo a perlado y es de transparente a translúcida. Tiene una dureza de 3.5 a 4, un peso específico de 2.9 g/cm³ y forma la roca denominada dolomita. (DGDM, 2017)

4.4. Restauración del suelo ácido

La restauración del suelo ácido debe contemplar las barreras que impidan retornar al equilibrio elemental de la química del suelo. La incorporación de enmiendas calizas provoca un incremento del pH del suelo, neutraliza la toxicidad del Al⁺³, mejora la actividad microbológica e incrementa la disponibilidad del nitrógeno (N) y del fósforo (P), favorece la porosidad, mejora la circulación del agua y aire, etc. También se ha descrito que las enmiendas calizas mejoran el contenido de Ca⁺² en los suelos, mejorando así la producción de cultivos, mejora las condiciones nutricionales en el suelo y en el subsuelo debido a la neutralización del Al⁺³. (Bernier & Alfaro, 2006)

Según Orsag (2010) la neutralización del aluminio intercambiable presente en la solución extraída del suelo, se consigue con la adición de cal, práctica conocida como el encalado que provoca la precipitación del aluminio, al formar Al(OH)₃ (gibbsite) que

precipita, eliminando el Al^{+3} intercambiable de la solución suelo, situación inicial que favorece al crecimiento de las raíces de las plantas (Citado por Lima, 2020).

4.5. Porcentaje de saturación de aluminio deseado

En la Tabla 5 se presentan los valores de tolerancia de saturación de aluminio de algunos cultivos y el porcentaje recomendado de saturación (PRS) para su producción.

Tabla 5: Porcentaje de saturación de aluminio máximo en cultivos

Porcentaje recomendado de saturación de aluminio (PRS) para cultivos en producción (Bertsch, 1995).	
Cultivo	PRS (%)
Banano	<15
Cacao	<20
Café	<25
Camote	<20
Caña de azúcar	<20
Cítricos	<20
Estos valores de PRS han sido estimados a través de la práctica.	

Fuente: Espinoza & Molina (1999)

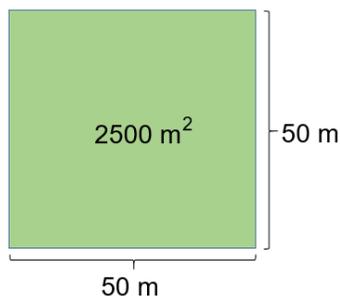
5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. TAMAÑO Y LOCALIZACION

5.1.1. Tamaño

Para realizar el estudio de la presente investigación se consideró una extensión de 2500 m² (Figura 3), equivalente a 1 cato, en este terreno se cuenta con la presencia de 1100 plantas de café de la variedad catuai rojo, las cuales se encuentran actualmente en proceso de producción y crecimiento, tal y como se ve en la Figura 4. El cultivo fue plantado a mediados de mayo de la gestión 2020.

Figura 3: Dimensiones de la parcela en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4: Parcela en estudio.



Fuente: Propia

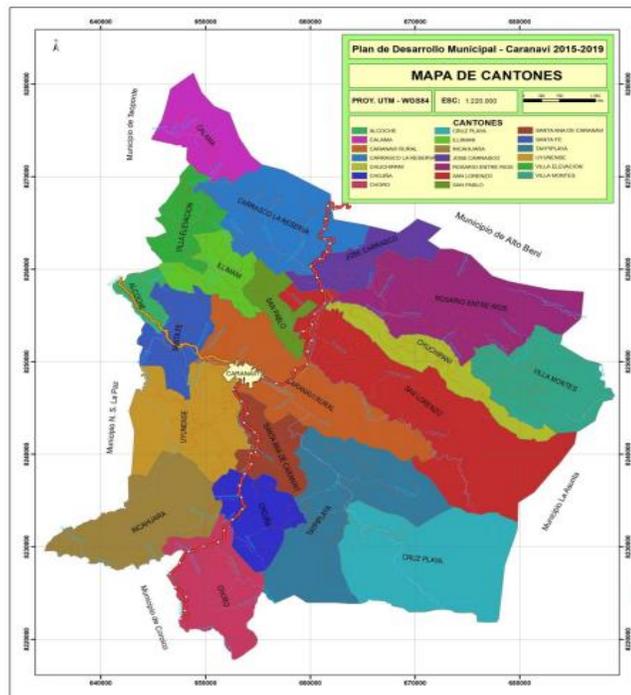
5.1.2. Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en la comunidad Tupac Katari del cantón de Chijchipani, Municipio de Caranavi del departamento de La Paz.

5.1.2.1. Ubicación geográfica

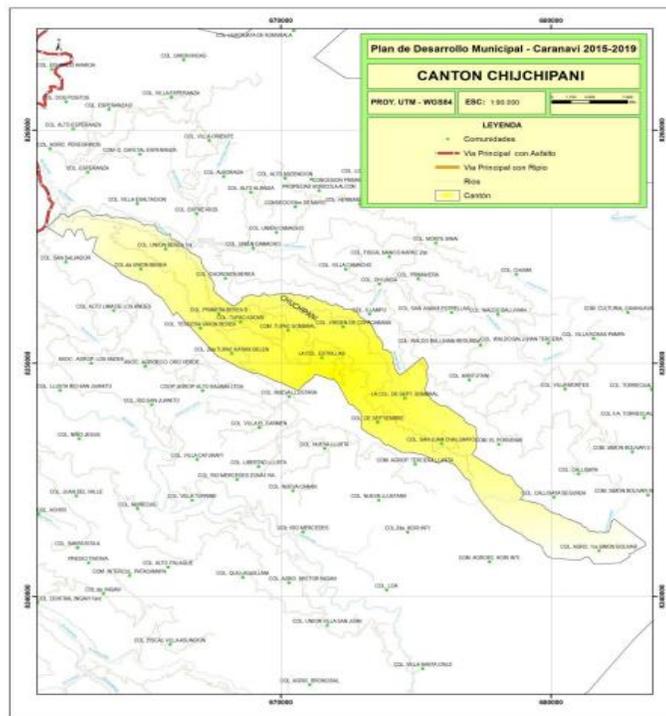
La Provincia Caranavi, del Departamento de La Paz, se encuentra situado al Noreste del Departamento de La Paz entre los valles subandinos en la región de la Amazonía sector conocido como la faja de los Yungas Alto, localizado a 168 [km] de distancia respecto de la ciudad de La Paz. El municipio a partir de la línea del Ecuador y el meridiano de Greenwich, se ubica entre los 15° 32' 30.00" y 16° 07' 3.00" de latitud sur y 67° 44' 50.00" y 67° 13' 50.00" de longitud oeste (Figura 5), por lo que geográficamente se localiza en la región sub andina. El cantón de Chijchipani se ubica a 15°38'0" de latitud y 67°35'20" de longitud (Figura 6). (PTDI - GAMC, 2020)

Figura 5: Mapa de cantones del Municipio de Caranavi



Fuente: PTDI - GAMC (2020)

Figura 6: Mapa del cantón de Chijchipani



Fuente: PTDI - GAMC (2020)

5.1.3. Características ecológicas

5.1.3.1. Clima y temperatura

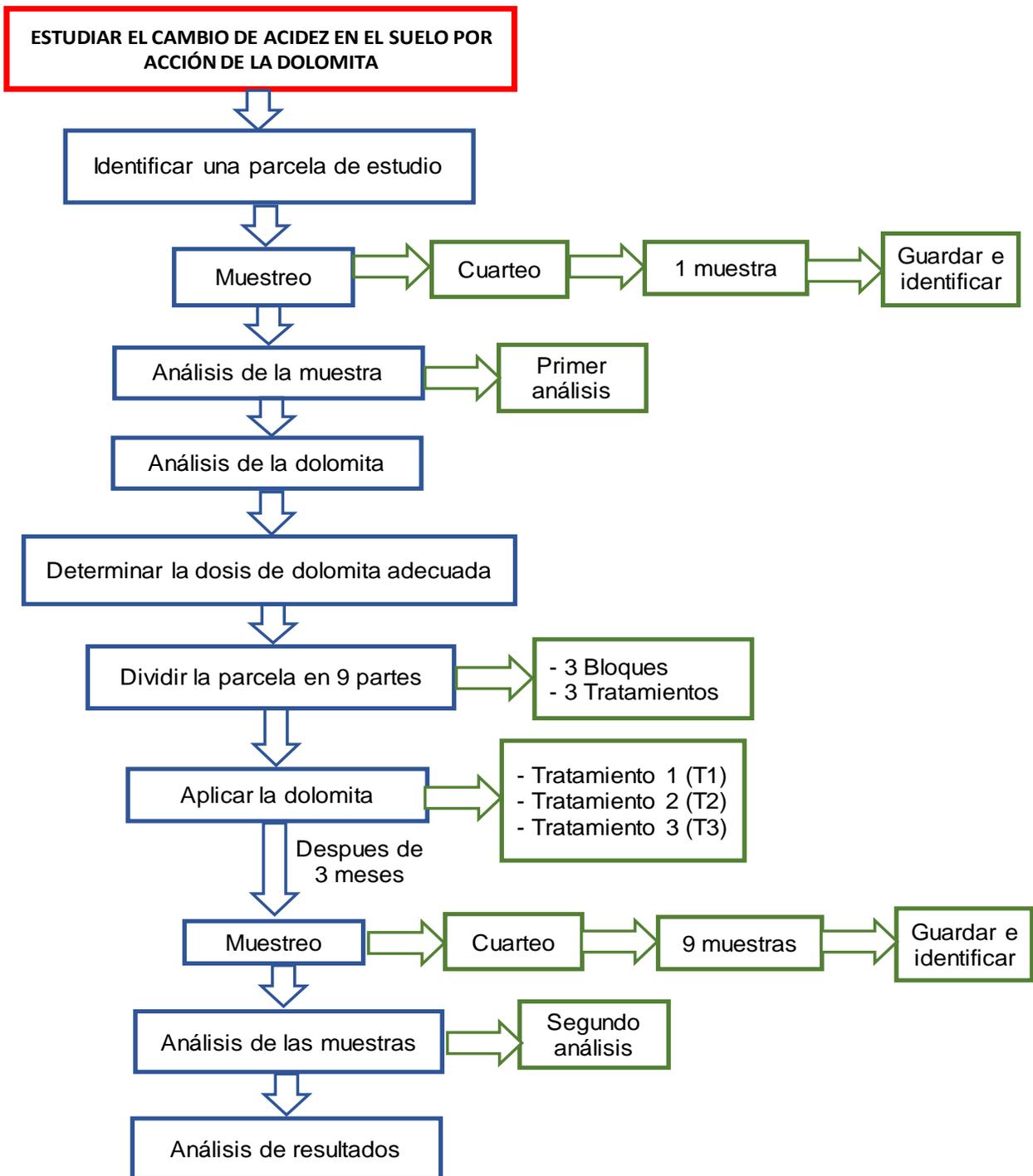
El clima del área es predominante cálido, con una temperatura media anual de 25,9°C, siendo los meses más cálidos de septiembre a noviembre, alcanzando una máxima absoluta alcanzada de 39,5°C en el mes de noviembre de 2008. Asimismo, la temperatura mínima media anual es de 19,6°C, siendo los meses fríos julio y agosto, registrándose una mínima absoluta de 8,5°C en julio de 2007. (SENAMHI, s. f.)

5.1.3.2. Precipitación pluvial

Por su ubicación en la franja de los Yungas, está altamente influenciada por la vegetación, con valores significativos en precipitación, cuya media anual registrada fue de 1.148 mm, con una frecuencia media anual de 90 días lluviosos, concentrándose las mayores aportaciones entre meses de diciembre, enero y febrero (PTDI - GAMC, 2020).

5.2. Diagrama para la determinación de dosis de dolomita

Figura 7: Diagrama para la determinación de dosis de dolomita



Fuente: Elaboración propia

5.3. Identificación de la parcela

- Se realizó el seguimiento del comportamiento en el suelo (Tabla 6) en un cato (2500 m²) de una parcela en la cual se encuentra el cultivo de café.

Tabla 6: Información de la parcela.

Departamento	La Paz
Cantón	Chijchipani
Comunidad	Túpac Katari
Propietario (Beneficiario del IPDSA)	Víctor Mamani Chura
Extensión	2500 m ²
Altura	1196 m.s.n.m.
Latitud - Longitud	15°48'33" – 67°25'37"
Temperatura ambiente promedio	29 °C

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Muestreo de suelos

5.4.1. Materiales

Tabla 7: Lista de materiales para el muestreo de suelos.

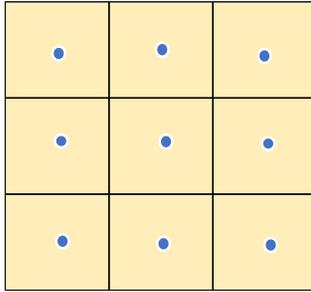
N°	Material	Cantidad
1	Picota	1
2	Pala	1
3	Balde	1
4	Palustre	1
5	Bolsa	18
6	Etiqueta	9
7	Scotch o cinta adhesiva	1

Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Procedimiento

- Se delimito el área de trabajo.
- Se dividió la parcela en 9 partes (Figura 8) y de cada una se obtiene una submuestra (cuarteo). Esto se realizó al centro de cada parte, dando un total de 9 submuestras.

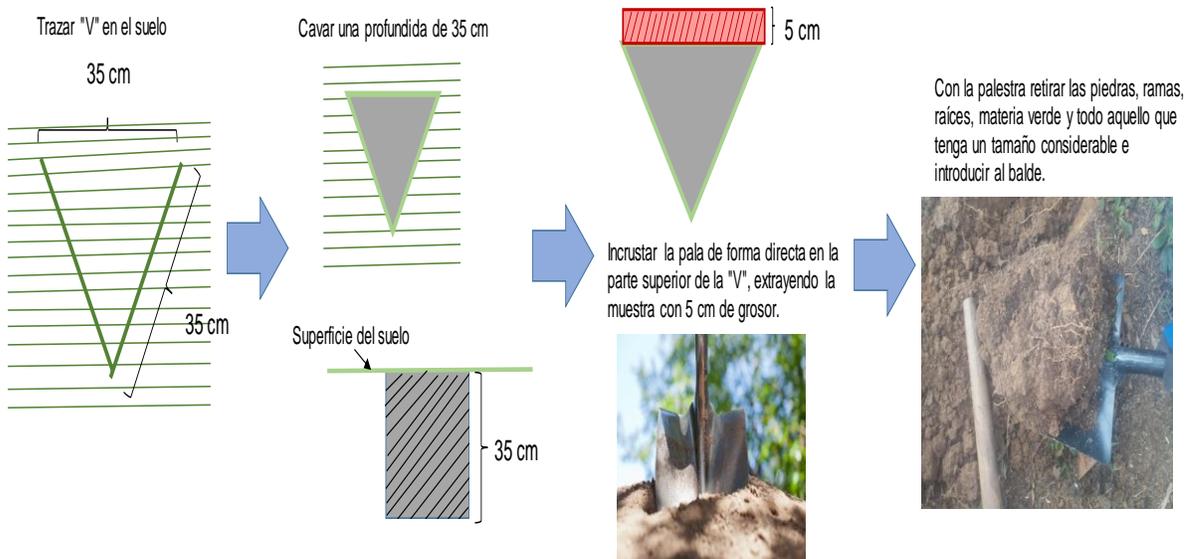
Figura 8: División de la parcela para toma de submuestras



Fuente: Elaboración propia

- Como se describe en la Figura 9, para extraer cada una de las submuestras se trazó una “V” en el suelo y con la picota se cava a una profundidad de 35 cm.
- Se tomó la pala y con mucho cuidado se extrajo la submuestra de la parte abierta de la “V”, debe tener un espesor de 5 cm.
- Con la palestra se retiró las piedras, ramas, raíces, materia verde y todo aquello que tenga un tamaño considerable. Esto se hace mientras la muestra continua en la pala.
- Se coloca la submuestra en el balde y mezclar. Se debe repetir el procedimiento nueve veces en cada punto de submuestreo mostrado en la Figura 9.

Figura 9: proceso de extracción de submuestras



Fuente: Elaboración propia

- Se mezclaron bien las 9 sub muestras en el balde. Se realizó un cuarteo varias veces (entre 4 a 6 veces) (Figura 10), hasta obtener una muestra de 1Kg aproximadamente.

Figura 10: Cuarteo de muestra



Fuente: Elaboración propia

- Se guardó la muestra en una bolsa con un cierre hermético y se identificó.
- Se procedió con el traslado de la muestra a laboratorio para el análisis respectivo.

El procedimiento para el muestreo se realizó en base a la “*Guía técnica para muestreo de suelos*” (Mendoza & Espinoza, 2017) y la “*Guía para muestreo de suelos*” (Ministerio del Ambiente, 2014).

5.5. Análisis de la muestra de suelo

5.5.1. Preparación de la muestra

5.5.1.1. Material

Tabla 8: Materiales para preparación de la muestra

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Tamiz	Malla#12 – 170mm	1
2	Bandeja de acero inoxidable		1

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.2. Equipo

Tabla 9: Equipos para preparación de la muestra

N°	Equipo	Cantidad
1	Estufa	1

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.3. Procedimiento

- Secar la muestra a 40°C en la estufa durante 6 horas.
- Se pasa por un tamiz de malla #12 - 170 mm (Figura 11).

Figura 11: Tamizado de la muestra



Fuente: Propia

Para la preparación de las muestras de suelo en laboratorio se recurrió al “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal” (McKean, 1993), a la guía de “Métodos analíticos para suelos ácidos y plantas” (Salinas & García, 1979) y al “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017).

5.5.2. Determinación de pH y conductividad

5.5.2.1. Materiales

Tabla 10: Materiales para la determinación de pH y conductividad

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	5
5	Probeta	100 ml	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.2.2. Equipo

Tabla 11: Equipos para la determinación de pH y conductividad

N°	Equipo	Cantidad
1	Potenciómetro	1
2	Conductivímetro	1
3	Balanza	1

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2.3. Reactivos

Tabla 12: Reactivos para medir pH y conductividad

N°	Reactivo	Formula
1	Cloruro de potasio	KCl

Fuente: Elaboración propia

5.5.2.4. Procedimiento

- En un vaso de 100ml pesar 20 g de suelo.
- Añadir 60ml de KCl (0.1M).
- Agitar 1 minuto.
- Dejar reposar durante 2 horas (Figura 12). Luego filtrar.
- Medir pH con el potenciómetro (pH-metro).
- Medir la conductividad en $\mu\text{S/cm}$. Calibrar usando la solución de KCl como blanco.
- Repetir 3 veces.

Figura 12: Determinación de pH y conductividad.



Fuente: Propia.

Para medir el pH y la conductividad se utilizó de referencia el método descrito en el “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017) y la guía “Prácticas de Edafología - Métodos didácticos para análisis de suelos” (Andrades et al., 2015).

5.5.3. Determinación de la textura

5.5.3.1. Materiales

Tabla 13: Materiales para determinar la textura

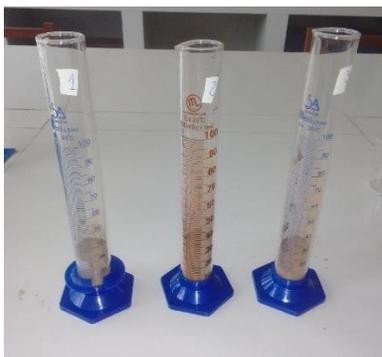
N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
3	Vasos de precipitado	100 ml	5
3	Probeta	100 ml	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.3.2. Procedimiento

- Introducir la muestra de suelo en la probeta hasta la marca de 30 ml.
- Añadir 50 ml de agua destilada.
- Agitar con una varilla durante 5 minutos.
- Dejar reposar 30 minutos (Figura 13).
- Medir la cantidad de arcilla, limo y arena de acuerdo al volumen de la probeta.
- Calcular en porcentaje e interpretar en el triángulo de texturas.
- Realizar por triplicado.

Figura 13: Determinación de la textura



Fuente: Propia

Para la determinación de la textura por el método de la sedimentación se utilizó de referencia el “*Estudio de cuatro adaptaciones de métodos de observación y determinación de la textura del suelo*” (Molera & Llitjos, 1995).

5.5.4. Determinación de la densidad aparente y densidad real

5.5.4.1. Materiales

Tabla 14: Materiales para determinación de la densidad

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	3
5	Probeta	100 ml	3

Fuente: Elaboración propia

5.5.4.2. Equipos

Tabla 15: Equipos para determinación de la densidad

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.4.3. Procedimiento

- Pesar 50g de suelo, por triplicado.
- Colocar en la probeta, remover para que se acomoden las partículas. Registrar volumen (volumen de muestra).
- Calcular la densidad aparente.
- Vaciar la muestra en un vidrio de reloj y en la misma probeta medir 50ml de agua destilada.
- Agregar la muestra removiendo. Dejar que sedimente (Figura 14).
- Medir el volumen de la mezcla.
- Determinar la suma de los volúmenes (volumen de la muestra + volumen de agua).
- Determinar el volumen del espacio poroso (volumen del espacio poroso = (volumen de la muestra + volumen de agua) – volumen de la mezcla).

- Calcular el volumen de sólidos (volumen de sólidos = volumen de muestra – volumen de espacio poroso).

Figura 14: Determinación de la densidad



Fuente: Propia

Para el procedimiento de determinación de la densidad por el método de la probeta se utilizó como referencia el “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017) y “Propiedades físicas del suelo” (Rucks et al., 2004).

5.5.5. Determinación de la humedad y materia orgánica

5.5.5.1. Materiales

Tabla 16: Materiales para determinación de humedad y materia orgánica

N°	Material	Cantidad
1	Crisol	1
2	Pinzas de agarre	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.5.2. Equipos

Tabla 17: Equipos para determinación de humedad y materia orgánica

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1
2	Estufa	1
3	Mufla	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.5.3. Procedimiento

- Pesar el crisol y sobre el 8g de muestra. Realizar por triplicado.
- Llevar a la estufa, secar a 105°C por 4 horas.
- Dejar enfriar y luego pesar el crisol con la muestra (masa de crisol + masa de muestra seca).
- Llevar el crisol con la muestra seca a la mufla a 550°C durante 4 horas (Figura 15).
- Dejar enfriar y pesar el crisol con la muestra (masa de crisol + masa de muestra calcinada).

Figura 15: Determinación de humedad y materia orgánica



Fuente: Propia

Para la determinación de la materia orgánica por calcinación se utilizó como referencia el “*Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*” (Bazán, 2017).

5.5.6. Determinación de la acidez intercambiable y aluminio intercambiable

5.5.6.1. Materiales

Tabla 18: Materiales para la determinación de acidez intercambiable

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	2

5	Probeta	100 ml	2
6	Matraz erlenmeyer	250 ml	9
7	Embudo analítico		2
8	Matraz aforado	250 ml	3
9	Matraz aforado	25 ml	1
10	Bureta	50 ml	2

Fuente: Elaboración propia

5.5.6.2. Equipos

Tabla 19: Equipos para la determinación de acidez intercambiable

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1
2	Estufa	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.6.3. Reactivos

Tabla 20: Reactivos para la determinación de acidez intercambiable

N°	Reactivo	Formula molecular
1	Cloruro de potasio	KCl
2	Hidróxido de sodio	NaOH
3	Ácido clorhídrico	HCl
4	Fluoruro de sodio	NaF
5	Fenolftaleína	C ₂₀ H ₁₄ O ₄
6	Ftalato ácido de potasio	C ₈ H ₅ KO ₄
7	Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃
8	Naranja de metilo	C ₁₄ H ₁₄ N ₃ NaO ₃ S

Fuente: Elaboración propia

5.5.6.4. Procedimiento

- Pesar 10 g de muestra.
- Añadir 50 ml de KCl (1M) y agite durante 5 minutos.
- Filtrar por gravedad lavando la muestra con 3 porciones de 10 ml de KCl (1M).
- Aforar a 100 ml con KCl (1M) y agite para obtener una mezcla homogénea.
- Transferir 25 ml del extracto obtenido a un Erlenmeyer de 250 ml.

- Agregar 3 gotas de fenolftaleína y títule con NaOH (0.05N) hasta la aparición de un color rosado pálido permanente (Figura 16). Anote los ml de NaOH gastados en la titulación.
- Calcular la acidez intercambiable (Al^{+3} y H^+).
- Después de la titulación anterior, agregar gotas de HCl (0.05N) para que el color rosado desaparezca.
- Agregar 10 ml de NaF (1M).
- Titular con HCl (0.05N) hasta que el color desaparezca otra vez por más de un minuto.

Estandarización de NaOH (0,05 N):

- Secar 200 mg de ftalato ácido de potasio durante una hora a 110°C.
- Pesar 50 mg de se ftalato ácido de potasio. Realizar por triplicado.
- En matraz erlenmeyer se disuelve cada una de las muestras con 50 ml de agua destilada y se agregan 3 gotas de fenolftaleína.
- Valorar con hidróxido de sodio hasta la primera aparición perceptible de un color rosa. Registrar el volumen gastado de NaOH.
- Calcular la concentración real del hidróxido de sodio.

Estandarización de HCl (0,05 N):

- Secar 400 mg de carbonato de sodio durante 2 horas a 110 °C.
- Pesar 100 mg de carbonato de sodio. Realizar por triplicado.
- En un matraz erlenmeyer disolver cada una de las muestras con 50 ml de agua destilada y se agrega 3 gotas de naranja de metilo.
- Valorar la solución de carbonato de sodio con la solución de ácido clorhídrico, hasta que el color indicador vire de violeta hasta transparente.
- Al llegar a este primer cambio se calienta la solución hasta que hierva suavemente
- Se deja enfriar al ambiente y se le añade 3 gotas de anaranjado de metilo
- Luego se continua la valoración hasta que el indicador vire de amarillo canario a amarillo naranja. Registrar el volumen gastado de HCl.

- Calcular la concentración real de la solución de ácido clorhídrico.

Figura 16: Determinación de acidez intercambiable y aluminio intercambiable



Fuente: Propia

Para la determinación de acidez y aluminio intercambiable se usó como referencia el “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal” (McKean, 1993), la “Guía para el Muestreo de Suelos” (Ministerio del Ambiente, 2014) y el “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017).

5.5.6.5. Reacciones

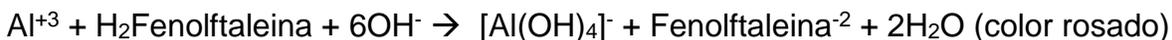
Fenolftaleína de medio neutro o ligeramente ácido a medio básico:



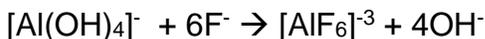
Fenolftaleína de medio básico a medio neutro o ligeramente ácido:



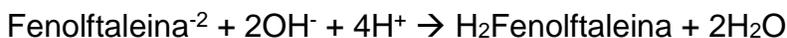
Titulación de alícuota con solución de NaOH:



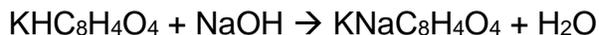
Añadiendo la solución de NaF:



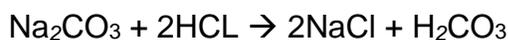
Titulando la base generada con HCl:



Estandarización de NaOH:



Estandarización de HCl:



5.5.7. Determinación de calcio y magnesio intercambiable

5.5.7.1. Materiales

Tabla 21: Materiales para la determinación de calcio y magnesio

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	2
5	Probeta	100 ml	2
6	Matraz erlenmeyer	250 ml	4
7	Embudo analítico		2
8	Matraz aforado	250 ml	2
9	Bureta	50 ml	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.7.2. Equipos

Tabla 22: Equipos para la determinación de calcio y magnesio

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.7.3. Reactivos

Tabla 23: Reactivos para la determinación de calcio y magnesio

N°	Reactivo	Formula molecular
1	Acetato de amonio	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$
2	Cloruro de amonio	NH_4Cl
3	Amoniaco	NH_3

4	EDTA	$C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$
5	Hidróxido de sodio	NaOH
6	Negro de eriocromo T (NET)	$C_{20}H_{12}N_3O_7SNa$
7	Murexida	$C_8H_8N_6O_6$
8	Trietanolamina	$C_6H_{15}NO_3$

Fuente: Elaboración propia

5.5.7.4. Procedimiento

Determinación de calcio y magnesio:

- Pesar 20 g de muestra.
- Añadir 25 ml de CH_3COONH_4 (1M) y agite durante 5 minutos. Dejar reposar 2 horas.
- Filtrar por gravedad lavando la muestra con 2 porciones de 10 ml de CH_3COONH_4 (1M).
- Traspase la muestra a un matraz aforado de 50 ml, diluir con agua destilada. Agitar durante unos minutos.
- Transferir 25 ml de la solución problema a un matraz erlenmeyer de 125 ml.
- Añadir 100 mg de NH_4Cl .
- Añadir 4 ml de NH_3 .
- Añadir 50 mg de negro de eriocromo T.
- Valorar la solución con EDTA (0.002 M) estandarizado (Figura 17).
- Calcular el contenido de calcio y magnesio.

Figura 17: Determinación de calcio y magnesio



Fuente: Propia

Determinación de calcio:

- Transferir 25 ml de la solución problema a un matraz erlenmeyer de 125 ml.
- Añadir 200 mg de NaOH, pH>12 en estas condiciones precipita el magnesio y solo el calcio reacciona con el EDTA.
- Añadir 100 mg de murexida.
- Añadir 100 mg de trietanolamina. Acompleja el hierro y aluminio, para prevenir su interferencia.
- Valorar la solución con EDTA (0.02 M) estandarizado (Figura 18).
- Calcular el contenido de calcio.

Figura 18: Determinación de calcio



Fuente: Propia

Estandarización de EDTA (0,02 M):

- Pesar 50 mg de carbonato de calcio y disolver en 25 ml de agua destilada.
- Transferir a un matraz aforado de 250 ml y diluir con agua destilada. Agitar durante 5 minutos.
- Transferir 25 ml de la solución a un matraz erlenmeyer de 250 ml. Esta solución contiene 5 mg de carbonato de calcio.
- Añadir 100 mg de NH_4Cl .
- Añadir 4 ml de NH_3 .
- Añadir 100 mg de negro de eriocromo T.
- Valorar con la solución de EDTA y medir el volumen gastado.
- Realizar por triplicado.
- Calcular la concentración de EDTA.

Para la determinación de calcio y magnesio se usó como referencia el “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal” (McKean, 1993), la “Guía para el Muestreo de Suelos” (Ministerio del Ambiente, 2014) y el “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017).

5.5.7.5. Reacciones

Añadiendo el indicador negro de eriocromo T:



Valoración del calcio y magnesio con EDTA:



Adicionando hidróxido de sodio para proporcionar el medio básico, pH > 12



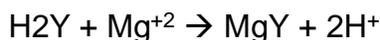
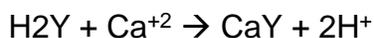
Añadiendo indicador murexida:



Valoración del calcio con EDTA:



Reacción del EDTA con los iones calcio y magnesio:



5.5.8. Determinación de nitrógeno

5.5.8.1. Materiales

Tabla 24: Materiales para la determinación de nitrógeno

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	2
5	Pipeta graduada	10 ml	2

6	Matraz erlenmeyer	250 ml	2
7	Balón de destilación		2
8	Condensador		1
9	Matraz aforado	250 ml	2
10	Bureta	50 ml	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.8.2. Equipos

Tabla 25: Equipos para la determinación de nitrógeno

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1
2	Hornilla	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.8.3. Reactivos

Tabla 26: Reactivos para la determinación de nitrógeno

N°	Reactivo	Formula molecular
1	Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄
2	Sulfato de sodio	Na ₂ SO ₄
3	Sulfato de cobre	CuSO ₄
4	Hidróxido de sodio	NaOH
5	Ácido bórico	H ₃ BO ₃
6	Ácido clorhídrico	HCl

Fuente: Elaboración propia

5.5.8.4. Procedimiento

- Pesar 1 g de muestra.
- Agregar 4 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- Agregar el catalizador (1 g de sulfato de sodio + 0,0125 g de sulfato de cobre).
- Digerir la muestra en bloques a 370°C durante 30 minutos.
- Dejar enfriar y agregar 20 ml de agua destilada.
- Agregar 20 ml de la solución de hidróxido de sodio al 30% y destilar. Recibir el destilado en 10 ml de una solución de ácido bórico al 4% (Figura 19).

- Titular el destilado con HCl 0.05 N hasta lograr un cambio de color azul a rojizo mate de la solución de H₃BO₃. Realizar por triplicado.
- Preparar un blanco con todos los reactivos necesarios menos la muestra, este se titula y su volumen se resta a las demás muestras en la titulación.

Figura 19: Determinación de nitrógeno total



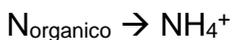
Fuente: Propia

Estandarización del HCl (0,05N):

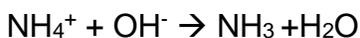
- Este proceso se describe en el punto 5.5.6.4.
- Se usó el mismo HCl ya estandarizado en el proceso de determinación de la acidez intercambiable.

5.5.8.5. Reacciones

Digestión de la muestra:



Añadiendo el NaOH:



En la destilación, recibiendo en ácido bórico:



Titulación del dihidrogeno borato con ácido clorhídrico:



5.5.9. Determinación de sodio y potasio

5.5.9.1. Materiales

Tabla 27: Materiales para determinación de sodio y potasio

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	2
5	Pipeta volumétrica	10 ml	2
6	Pipeta volumétrica	2 ml	2
7	Pipeta volumétrica	1 ml	2
8	Matraz erlenmeyer	125 ml	3
9	Matraz aforado	250 ml	3
10	Matraz aforado	100 ml	4

Fuente: Elaboración propia

5.5.9.2. Equipos

Tabla 28: Equipos para determinación de sodio y potasio

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1
2	Absorción atómica	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.9.3. Reactivos

Tabla 29: Reactivos para determinación de sodio y potasio

N°	Reactivo	Formula molecular
1	Cloruro de sodio	NaCl
2	Cloruro de potasio	KCl
3	Ácido clorhídrico	HCl
4	Acetato de amonio	CH ₃ COONH ₄

Fuente: Elaboración propia

5.5.9.4. Procedimiento

- Pesar 5 g de suelo en un vaso de precipitado de 100 ml.

- Agregar 25 ml de acetato de amonio 1M y agite por 15 minutos. Dejar en reposo 1 hora agitando de vez en vez.
- Filtrar recogiendo en un matraz erlenmeyer de 125 ml.
- Lavar el suelo con pequeñas cantidades de la solución de acetato de amonio.
- Transferir el destilado a un matraz aforado de 100 ml, agregar 0,8 ml de HCl concentrado y diluir con agua destilada.
- De ser necesario realizar otra dilución para que los valores se lean en la curva generada por los patrones.
- Realizar la lectura en el equipo de absorción atómica (Figura 20).

Figura 20: Determinación de sodio y potasio por absorción atómica



Fuente: Propia

Para los patrones

- Preparar 500 ml de cloruro de sodio 100 ppm y 500 ml de cloruro de potasio 100 ppm.
- Tomar 10 ml de la solución a 100 ppm y aforar a 100 ml, obteniendo una solución con una concentración de 10 ppm.
- Tomar 1 ml de la solución a 10 ppm, añadir 0,8 ml de HCl concentrado y aforar a 100 ml, obteniendo una concentración de 0,1 ppm.
- Tomar 2 ml de la solución a 10 ppm, añadir 0,8 ml de HCl concentrado y aforar a 100 ml, obteniendo una concentración de 0,2 ppm.
- Realizar la lectura en el equipo de absorción atómica.

Para la determinación de sodio y potasio se usó como referencia el “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal” (McKean, 1993), “Guía para el Muestreo de Suelos” (Ministerio del Ambiente, 2014) y el “Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego” (Bazán, 2017).

5.5.10. Determinación de Fosforo total

5.5.10.1. Materiales

Tabla 30: Materiales para la determinación de Fosforo total

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Piseta		1
2	Cepillo		1
3	Varilla		1
4	Vasos de precipitado	100 ml	2
5	Pipeta volumétrica	10 ml	2
6	Pipeta volumétrica	2 ml	2
7	Pipeta volumétrica	1 ml	2
8	Matraz erlenmeyer	125 ml	3
9	Matraz aforado	250 ml	3
10	Matraz aforado	100 ml	7

Fuente: Elaboración propia

5.5.10.2. Equipos

Tabla 31: Equipos para la determinación de Fosforo total

N°	Equipo	Cantidad
1	Balanza	1
2	Espectrofotómetro UV - VIS	1
3	Estufa	1
4	Hornilla	1

Fuente: Elaboración propia

5.5.10.3. Reactivos

Tabla 32: Reactivos para la determinación de Fosforo total

N°	Reactivo	Formula molecular
1	Ácido clorhídrico	HCl

2	Ácido Nítrico	HNO ₃
3	Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄
4	Molibdato de amonio tetra hidratado	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O
5	Metavanadato de amonio	NH ₄ VO ₃
6	Hidróxido de sodio	NaOH
7	Fosfato monobásico de potasio	KH ₂ PO ₄
8	Fenolftaleína	C ₂₀ H ₁₄ O ₄

Fuente: Elaboración propia

5.5.10.4. Procedimiento

- Pesar 200 mg de suelo en un vaso de precipitado de 100 ml.
- Añadir 1 ml de ácido sulfúrico y 5 ml de ácido nítrico. Digerir hasta un volumen aproximado de 1 ml, se tornará una solución incolora.
- Enfriar y adicionar aproximadamente 20 ml de agua destilada.
- Filtrar recogiendo en un matraz erlenmeyer de 125 ml.
- Lavar el suelo con pequeñas cantidades de agua destilada.
- Añadir 2 gotas de fenolftaleína y añadir NaOH (1N) hasta el viraje del indicador. Añadir gotas de HCl concentrado hasta que el color rosa desaparezca.
- Transferir la solución neutralizada a un matraz aforado de 100 ml y diluir, completando el volumen con agua destilada.
- De ser necesario realizar otra dilución para que los valores se lean en la curva generada por los patrones.
- Tomar 5 ml de la muestra y transferirla a un matraz aforado de 25 ml.
- Agregar 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato.
- Aforar y homogenizar.
- Realizar el calibrado del equipo con el blanco, 12,5 ml de solución de Vanadato-Molibdato diluida a 25 ml.
- Realizar dilución de la muestra de ser necesario.
- Realizar la lectura en el espectrofotómetro UV- Visible a una longitud de onda de 490 nm (Figura 21).

Figura 21: Determinación de fósforo total por espectrofotometría UV - VISIBLE



Fuente: Elaboración propia

Solución Vanadato-Molibdato:

- Disolver 2,5 g de molibdato de amonio tetrahidratado en 30 ml de agua destilada.
- Disolver 0,125 g de metavanadato de amonio en agua destilada, calentando a ebullición. Se enfría y se agrega 25 ml de ácido nítrico concentrado.
- Agregar lentamente la primera solución a la segunda, se homogeniza y se diluye a 100 ml.

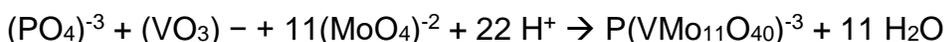
Para los patrones:

- Preparar 500 ml de fosfato monobásico de potasio 50 ppm. Agitar por unos minutos.
- Tomar 10 ml de la solución a 50 ppm y aforar a 100 ml, obteniendo una solución con una concentración de 5 ppm. Agitar por unos minutos.
- Tomar 10 ml de la solución a 50 ppm y aforar a 100 ml, obteniendo una solución con una concentración de 0,5 ppm. Agitar por unos minutos.
- Transferir 5 ml de la solución a 0,5 ppm a un matraz de 25 ml, añadir 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato y aforar. Se obtiene el patrón a 0,1 ppm.

- Transferir 1 ml de la solución a 5 ppm a un matraz de 25 ml, añadir 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato y aforar. Se obtiene el patrón a 0,2 ppm.
- Transferir 2 ml de la solución a 5 ppm a un matraz de 25 ml, añadir 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato y aforar. Se obtiene el patrón a 0,4 ppm.
- Transferir 4 ml de la solución a 5 ppm a un matraz de 25 ml, añadir 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato y aforar. Se obtiene el patrón a 0,8 ppm.
- Transferir 5 ml de la solución a 5 ppm a un matraz de 25 ml, añadir 12,5 ml de la solución Vanadato-Molibdato y aforar. Se obtiene el patrón a 1 ppm.
- Realizar la lectura en el espectrofotómetro.

Para la determinación de Fosforo total se usó como referencia el *“Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego”* (Bazán, 2017).

5.5.10.5. Reacción



5.5.11. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico CIC

5.5.11.1. Procedimiento

- Para obtener el valor de la capacidad de intercambio catiónico, solo se realiza la suma correspondiente de cationes intercambiables presentes en el suelo.

5.6. Análisis de la dolomita

5.6.1. Determinación de calcio y magnesio

- El análisis se realizó por volumetría, el procedimiento se describe en el punto 5.5.7.
- Se modifica la masa de la muestra tomando 100 mg de dolomita, esto porque se espera un resultado de entre 30 a 75 % de calcio y 15 a 25 % de magnesio. Esto significaría un volumen superior a los 1000 ml de EDTA 0,02 M.

5.6.2. Determinación del poder relativo de neutralización total (PRNT)

5.6.2.1. Material

Tabla 33: Materiales para la determinación del PRNT

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Tamiz	Malla#60 – 250µm	1

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.2. Equipo

Tabla 34: Equipos para la determinación del PRNT

N°	Equipo	Cantidad
1	Estufa	1

Fuente: Elaboración propia

5.6.2.3. Procedimiento

- Secar 250 g de muestra a 100°C en la estufa durante 2 horas.
- Pesar 200 g de muestra seca.
- Tamizar en tamiz de 250 µm (malla 60).

Para la determinación de capacidad de intercambio cationico se usó como referencia el “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal” (McKean, 1993).

5.7. Determinación del crecimiento de la planta

5.7.1. Material

Tabla 35: Material para determinación del crecimiento de la planta

N°	Material	Capacidad	Cantidad
1	Cinta métrica	100 m	1
2	Vernier	100 mm / precisión de 0,5 mm	1

Fuente: Elaboración propia

5.7.2. Procedimiento

- Medir la altura de la planta con la cinta métrica.
- Medir el diámetro de la planta con el vernier.
- Realizar el conteo de ramas.
- Realizar el conteo de hojas.

5.8. Diseño experimental

Para la evaluación de la acidez del suelo, se empleó el Diseño de Bloques Completos al Azar, el cual es utilizado en trabajos en donde se desea bloquear un factor (Ochoa, 2014), en el caso del presente trabajo se bloqueó la pendiente del terreno. Se evaluaron 3 tratamientos establecidos con 4 bloques.

5.8.1. Modelo lineal aditivo

Según Ochoa (2014), el modelo estadístico es el siguiente:

$$x_{ij} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: X_{ij} = Cualquier observación

μ = Media aritmética poblacional

β_j = Efecto j - esimo del bloque

α_i = Efecto i – esimo del tratamiento

ε_{ijk} = Error experimental

Los tratamientos fueron los siguientes:

T_0 = Testigo

T_1 = 80 (g) dolomita / planta

T_2 = 120 (g) dolomita /
planta

5.8.2. Características del campo experimental

Las características del campo se describen a continuación y se puede percibir de manera objetiva en la Figura 23.

Número de surcos por Unidad Experimental (U.E.): 3

Largo del surco U.E.: 16 m

Ancho de U.E.: 16 m

Área de evaluación U.E.: 256 m²

Distancia entre surcos: 1,14 m.

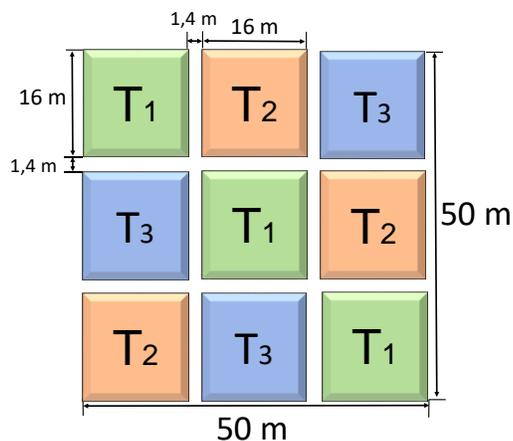
Largo de bloque: 50 m

Ancho de pasillos: 1,14 m.

Número de bloques: 3

Área total del ensayo: 2500 m²

Figura 22: Diseño de bloques completos al azar.



Fuente: Elaboración propia

5.8.3. Variables de respuesta

5.8.3.1. Variables edáficas

Se realizó el análisis de la muestra de suelo en laboratorio, describiéndose el proceso de los análisis en el punto 6.5. (Análisis de la muestra de suelo). Se considera como variables de respuesta al pH, conductividad eléctrica (CE), textura, acidez intercambiable (Al+H), Calcio (Ca), magnesio (Mg) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) ya que son las características que se modificaron por la aplicación de la dolomita en el suelo del cultivo.

5.8.3.2. Variables de respuesta en la planta

Se realizó las medidas de altura, diámetro, número de ramas y número de hojas, cuyo procedimiento está descrito en el punto 6.7. (Determinación del crecimiento de la planta).

6. DATOS, CALCULOS Y RESULTADOS

6.1. Determinación de las características físicas y químicas del suelo

6.1.1. Determinación de pH y conductividad

6.1.1.1. Datos y resultados

Tabla 36: Resultados de pH y conductividad

N°	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
Inicial	5,54	42,36
1	5,65	29,05
2	6,26	52,30
3	6,84	61,11
4	5,59	69,43
5	5,48	18,11
6	5,52	48,80
7	5,99	48,98
8	6,79	49,64
9	5,65	22,80

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Determinación de textura

6.1.2.1. Datos

Tabla 37: Datos para la determinación de textura

N°	Arcilla (ml)	Limo (ml)	Arena (ml)	Total visualizado
Inicial	5,33	21,50	15,50	42,33
1	6,25	21,53	15,42	43,20
2	5,19	22,02	15,35	42,56
3	5,11	22,00	15,22	42,33
4	5,02	21,61	12,70	39,33
5	6,00	20,22	15,93	42,15
6	5,26	22,10	12,97	40,33
7	5,20	21,58	13,9	40,68
8	5,03	21,66	11,53	38,22
9	5,89	21,02	15,11	42,02

Fuente: Elaboración propia

6.1.2.2. Cálculos

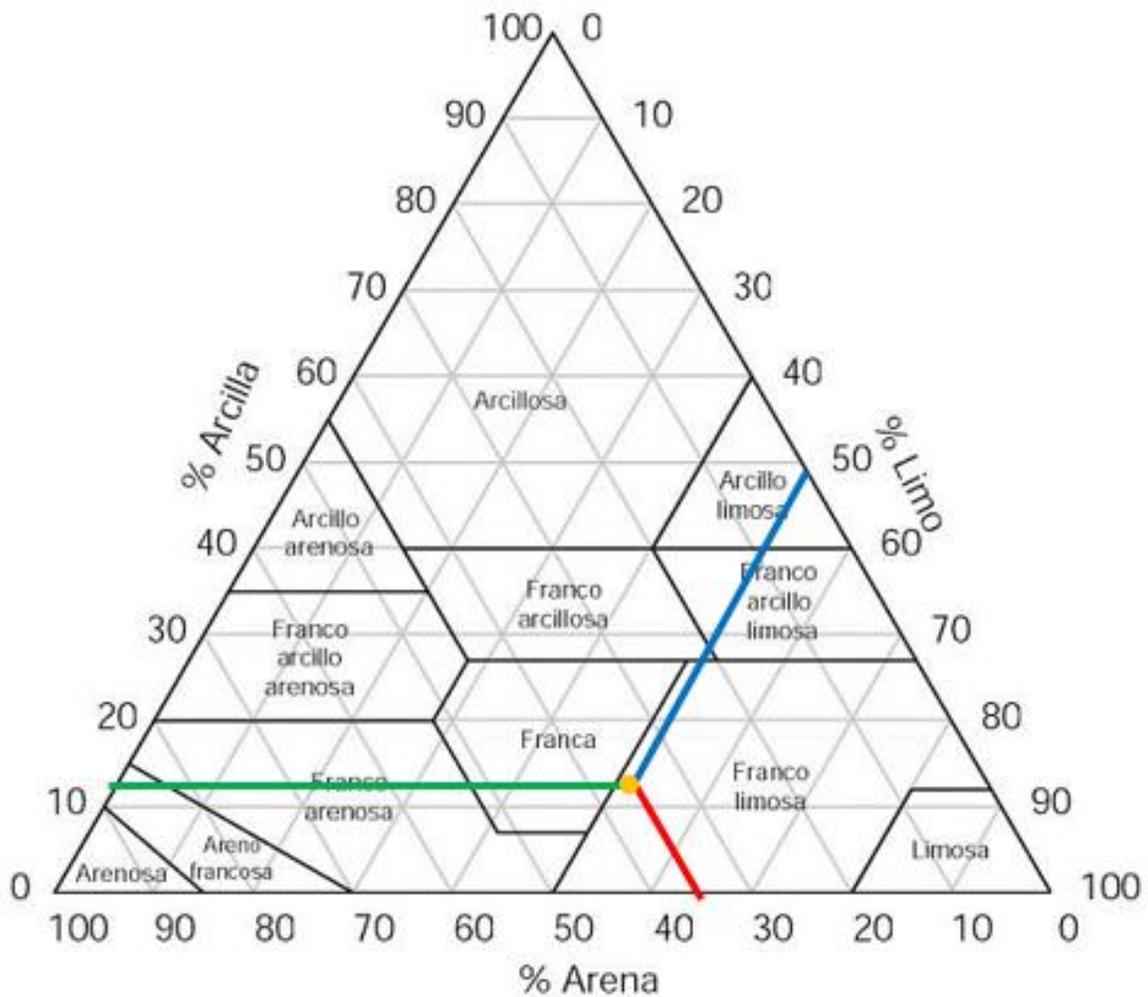
Ejemplo: Muestra inicial

$$\% \text{Arcilla} = \frac{5,33}{42,33} * 100 = 12,59\%$$

$$\% \text{Limo} = \frac{21,50}{42,33} * 100 = 50,79\%$$

$$\% \text{Arena} = \frac{15,50}{42,33} * 100 = 36,62\%$$

Figura 23: Triangulo de texturas.



Fuente: McKean (1993).

6.1.2.3. Resultados

Tabla 38: Resultados de textura

N°	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural
Inicial	12,59	50,79	36,62	Franco limoso
1	14,47	49,84	35,69	Franco
2	12,19	51,74	36,07	Franco limoso
3	12,07	51,98	35,95	Franco limoso
4	12,76	54,94	32,3	Franco limoso
5	14,23	47,97	37,8	Franco
6	13,04	54,80	32,16	Franco limoso
7	12,78	53,04	34,18	Franco limoso
8	13,16	56,67	30,17	Franco limoso
9	14,02	50,02	35,96	Franco limoso

Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Determinación de la densidad

6.1.3.1. Datos

Tabla 39: Datos para la determinación de densidad aparente y real

N°	m(muestra) (g)	V(muestra) (ml)	V(H ₂ O) (ml)	V(total) (ml)	V(mezcla) (ml)	V(espacio poroso) (ml)	V(sólidos) (ml)
Inicial	31,3329	29,67	30	59,67	42,33	17,34	12,33
1	30,4799	29,00	30	59,00	41,11	17,89	11,11
2	31,2457	29,40	30	59,40	42,26	17,14	12,26
3	31,2733	29,92	30	59,92	42,98	16,94	12,98
4	30,3656	29,10	30	59,10	41,96	17,14	11,96
5	30,2525	29,56	30	59,56	40,55	19,01	10,55
6	32,1436	30,48	30	60,48	43,88	16,60	13,88
7	32,5896	30,02	30	60,02	42,28	17,74	12,28
8	31,3123	29,54	30	59,54	42,60	16,94	12,60
9	31,6101	28,98	30	58,98	42,26	16,72	12,26

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial

- Cálculo de la densidad aparente:

$$\rho(\text{aparente}) = \frac{m(\text{muestra})}{V(\text{muestra})} = \frac{31,3329 \text{ g}}{29,67 \text{ ml}} = 1,0560 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

- Cálculo de la densidad real:

$$\rho(\text{real}) = \frac{m(\text{muestra})}{V(\text{sólidos})} = \frac{31,3329 \text{ g}}{12,33 \text{ ml}} = 2,5412 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

6.1.3.3. Resultados

Tabla 40: Resultados de densidad aparente y real

N°	$\rho(\text{aparente})$ (g/ml)	$\rho(\text{real})$ (g/ml)
Inicial	1,0560	2,5411
1	1,0510	2,7434
2	1,0627	2,5485
3	1,0452	2,4093
4	1,0434	2,5389
5	1,0234	2,8675
6	1,0545	2,3158
7	1,0855	2,6538
8	1,0599	2,4851
9	1,0907	2,5783

Fuente: Elaboración propia

6.1.4. Determinación de la humedad y materia orgánica

6.1.4.1. Datos

Tabla 41: Datos para la determinación de humedad y materia orgánica

N°	m(crisol) (g)	m(muestra) (g)	m(crisol + muestra seca) (g)	m(crisol + muestra calcinada) (g)
Inicial	19,9039	8,0561	27,7981	27,4972
1	19,2414	8,1651	26,7512	26,9684
2	20,6021	7,9812	28,0455	28,4233

3	20,8344	8,1522	28,2982	28,7992
4	20,3655	8,0027	27,9412	28,0156
5	20,5211	8,0862	28,2232	28,0221
6	19,6102	8,1204	27,1641	27,5012
7	19,6359	8,0211	27,1525	27,4621
8	19,3351	8,0325	26,9627	27,0752
9	19,5823	8,0024	27,2988	26,9033

Fuente: Elaboración propia

6.1.4.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial

- Calculo de la humedad:

$$m(\text{muestra seca}) = m(\text{crisol} + \text{muestraseca}) - m(\text{crisol}) = 27,7981 - 19,9039 \\ = 7,8942 \text{ g}$$

$$m(\text{humedad}) = m(\text{muestra}) - m(\text{muestra seca}) = 8,0561 - 7,8942 = 0,1619 \text{ g}$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{m(\text{humedad})}{m(\text{muestra})} * 100 = \frac{0,1619}{8,0561} * 100 = 2,010 \%$$

- Calculo de la materia orgánica:

$$m(\text{muestra calcinada}) = m(\text{crisol} + \text{muestra calcinada}) - m(\text{crisol})$$

$$m(\text{muestra calcinada}) = 27,4972 - 19,9039 = 7,5933 \text{ g}$$

$$m(\text{M.O.}) = m(\text{muestra}) - m(\text{muestra calcinada}) = 8,0561 - 7,5933 = 0,4628 \text{ g}$$

$$\% \text{M.O.} = \frac{m(\text{M.O.})}{m(\text{muestra})} * 100 = \frac{0,4628}{8,0561} * 100 = 5,74 \%$$

6.1.4.3. Resultados

Tabla 42: Resultados de humedad y materia orgánica

N°	%Humedad	%M.O.
Inicial	2,01	5,74
1	8,02	5,37
2	6,74	2,00
3	8,44	2,30

4	5,34	4,41
5	4,75	7,24
6	6,98	2,82
7	6,29	2,43
8	5,04	3,64
9	3,57	8,51

Fuente: Elaboración propia

6.1.5. Determinación de la acidez intercambiable

6.1.5.1. Datos

Tabla 43: Datos de la masa de suelo para la determinación de acidez intercambiable

N°	m(muestra) (g)
Inicial	10,0010
1	10,0115
2	10,1407
3	10,0035
4	10,1204
5	10,0399
6	10,0223
7	10,0088
8	10,0167
9	10,1066

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: Datos para estandarización de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio

Para la muestra	Estandarización de NaOH		Estandarización de HCl	
	m(ftalato) (g)	V _(NaOH) (ml)	m(NaCO ₃) (g)	V _(HCl) (ml)
Inicial	0,4877	45,3667	0,1270	40,7333
1 - 9	0,2248	22,5211	0,1018	36,5014

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45: Datos para la determinación de acidez intercambiable y aluminio intercambiable

N°	Determinación de acidez intercambiable	Determinación de aluminio
	V _(NaOH) (ml)	V _(HCl) (ml)
Inicial	4,2000	0,1867
1	4,0211	0,1000
2	3,0022	0,050
3	2,6448	0,050
4	3,1076	0,050
5	3,8256	0,1000
6	3,0241	0,050
7	3,1966	0,050
8	2,8644	0,050
9	3,4272	0,050

Fuente: Elaboración propia

6.1.5.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial

Estandarización de solución NaOH (0,05 N):

$$N(\text{NaOH}) = \frac{m(\text{ftalato})}{V(\text{NaOH}) * PM(\text{ftalato})}$$

$$N(\text{NaOH}) = \frac{0,4877\text{g}}{45,3667\text{ml} * 204,22 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1\text{l}}{1000\text{ml}}} = 0,0526 \text{ N}$$

Estandarización de solución HCl (0,05 N):

$$N(\text{HCl}) = \frac{2 * m(\text{NaCO}_3)}{V(\text{HCl}) * PM(\text{NaCO}_3)}$$

$$N(\text{HCl}) = \frac{2 * 0,1270\text{g}}{40,7333\text{ml} * 105,99 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1\text{l}}{1000\text{ml}}} = 0,0588 \text{ N}$$

Determinación de acidez intercambiable:

$$(Al + H) \left(\frac{\text{meq}}{\text{g suelo}} \right) = \frac{V(\text{NaOH}) * N(\text{NaOH})}{m(\text{muestra})} = \frac{4,2\text{ml} * 0,0526 \frac{\text{meq}}{\text{ml}}}{10,0010} = 0,0221 \left(\frac{\text{meq}}{\text{g suelo}} \right)$$

Calculo de la acidez intercambiable en meq / 100 g suelo:

$$0,0221 \frac{\text{meq}}{\text{g(suelo)}} * \frac{100}{100} = \frac{2,21\text{meq}}{100\text{g(suelo)}}$$

Determinación de aluminio intercambiable:

$$Al \left(\frac{\text{meq}}{\text{g suelo}} \right) = \frac{V(\text{HCl}) * N(\text{HCl})}{m(\text{muestra})} = \frac{0,1867\text{ml} * 0,0588 \frac{\text{meq}}{\text{ml}}}{10,0010} = 0,001 \left(\frac{\text{meq}}{\text{g suelo}} \right)$$

Calculo del aluminio intercambiable en meq / 100 g suelo:

$$0,001 \frac{\text{meq}}{\text{g(suelo)}} * \frac{100}{100} = \frac{0,1\text{meq}}{100\text{g(suelo)}}$$

Determinación de hidrogenión intercambiable:

$$H \left(\frac{\text{meq}}{100\text{g suelo}} \right) = \frac{2,21\text{meq}}{100\text{g(suelo)}} - \frac{0,1\text{meq}}{100\text{g suelo}} = \frac{2,11 \text{ meq}}{100\text{g suelo}}$$

6.1.5.3. Resultados

Tabla 46: Resultados de la estandarización de HCl y NaOH

N°	NaOH estandarizado (N)	HCl estandarizado (N)
Inicial	0,0526	0,0588
1 - 9	0,0489	0,0526

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47: Resultados de acidez intercambiable, aluminio intercambiable e hidrogeniones

N°	(Al + H) (meq /100 g suelo)	Al (meq /100 g suelo)	H (meq /100 g suelo)
Inicial	2,21	0,11	2,10
1	1,96	0,05	1,91
2	1,45	0,03	1,42
3	1,29	0,03	1,26

4	1,50	0,03	1,47
5	1,86	0,05	1,81
6	1,48	0,03	1,45
7	1,56	0,03	1,53
8	1,40	0,03	1,37
9	1,66	0,03	1,63

Fuente: Elaboración propia

6.1.6. Determinación de calcio y magnesio

6.1.6.1. Datos

Tabla 48: Datos de la masa de la muestra de suelo

N°	m(muestra) (mg)
Inicial	19874,5
1	20013,2
2	20020,6
3	20001,5
4	20003,0
5	20000,2
6	20011,8
7	20002,7
8	20008,8
9	20010,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49: Datos para la estandarización de EDTA

N°	Estandarización de EDTA	
	m(CaCO ₃) (g)	V(EDTA) (ml)
Inicial	0,0051	22,2
1 - 9	0,0050	26,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50: Datos para determinar calcio y magnesio

N°	Determinación de calcio y magnesio	Determinación de calcio	Volumen gastado para magnesio
	V _(EDTA-Ca-Mg) (ml)	V _(EDTA-Ca) (ml)	V _(EDTA-Mg) (ml)
Inicial	1,73	1,27	0,46
1	3,03	2,58	0,95
2	3,75	3,28	0,30
3	4,52	3,95	0,27
4	4,23	3,84	0,39
5	2,56	2,04	0,52
6	3,49	3,02	0,67
7	3,88	3,38	0,45
8	4,61	4,00	1,50
9	2,02	1,53	0,34

Fuente: Elaboración propia

6.1.6.2. Cálculos

Ejemplo: muestra inicial

Estandarización del EDTA:

$$M(\text{EDTA}) = \frac{m(\text{CaCO}_3)}{\text{PM}(\text{CaCO}_3) * V(\text{EDTA}) * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}}$$

$$M(\text{EDTA}) = \frac{0,0051 \text{ g}}{100,09 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 22,2 \text{ ml} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}} = 0,0023 \text{ M}$$

Determinación de calcio en meq / 100 g suelo:

Calculo del porcentaje de calcio:

$$\% \text{Ca} = \frac{V(\text{EDTA} - \text{Ca}) * M(\text{EDTA}) * A(\text{Ca})}{m(\text{muestra})} * 100$$

$$\% \text{Ca} = \frac{1,27 \text{ ml} * 0,0023 \frac{\text{mmol}}{\text{ml}} * 40,08 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} * 2}{19874,5 \text{ mg}} * 100 = 0,0012\%$$

Calculo de calcio en meq / 100 g suelo:

$$0,0012 \frac{mg(Ca)}{mg(suelo)} * \frac{1000 mg(suelo)}{1g(suelo)} * \frac{1mmol(Ca)}{40,08 mg(Ca)} * \frac{2 meq(Ca)}{1 mmol(Ca)} = 0,0599 \frac{meq(Ca)}{g(suelo)}$$

$$0,0599 \frac{meq(Ca)}{g(suelo)} * \frac{100}{100} = \frac{5,99 meq(Ca)}{100 g(suelo)}$$

Determinación de magnesio en meq /100 g suelo:

Calculo del volumen de EDTA para el magnesio:

$$V(EDTA - Mg) = V(EDTA - Ca - Mg) - V(EDTA - Ca)$$

$$V(EDTA - Mg) = 1,73 - 1,27 = 0,46 ml$$

Calculo del porcentaje de magnesio:

$$\%Mg = \frac{V(EDTA - Mg) * M(EDTA) * A(Mg)}{m(muestra)} * 100$$

$$\%Mg = \frac{0,46 ml * 0,0023 \frac{mmol}{ml} * 24,30 \frac{mg}{mmol} * 2}{19874,5mg} * 100 = 0,00026\%$$

Calculo de magnesio en meq / 100 g suelo:

$$0,00026 \frac{mg(Mg)}{mg(suelo)} * \frac{1000 mg(suelo)}{1g(suelo)} * \frac{1mmol(Mg)}{24,30 mg(Mg)} * \frac{2 meq(Mg)}{1 mmol(Mg)}$$

$$= 0,0214 \frac{meq(Mg)}{g(suelo)}$$

$$0,0214 \frac{meq(Mg)}{g(suelo)} * \frac{100}{100} = \frac{2,14 meq(Mg)}{100 g(suelo)}$$

6.1.6.3. Resultados

Tabla 51: Resultados de la estandarización de EDTA

N°	EDTA (M) estandarizado
Inicial	0,0023
1 - 9	0,0019

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52: Resultados de calcio y magnesio

N°	Ca (meq /100 g suelo)	Mg (meq /100 g suelo)
Inicial	5,99	2,14
1	7,89	3,62
2	10,82	1,15
3	11,97	0,99
4	12,31	1,48
5	7,75	1,98
6	10,71	2,55
7	10,60	1,73
8	11,81	5,68
9	6,38	1,32

Fuente: Elaboración propia

6.1.7. Determinación de nitrógeno total

6.1.7.1. Datos

Tabla 53: Masa de la muestra de suelo en miligramos para determinación de nitrógeno total

N°	m(muestra) (mg)
Inicial	1013,50
1	1033,25
2	1007,94
3	1028,56
4	1068,4
5	1011,56
6	1004,74
7	1006,81
8	1017,25
9	1046,87

Fuente: Elaboración propia

Se utiliza el ácido clorhídrico estandarizado para la determinación de acidez intercambiable (punto 6.1.5.3.).

Tabla 54: Ácido clorhídrico estandarizado para la titulación y volumen gastado en la titulación del blanco

N°	HCl estandarizado (N)	V _(HCl-Tblanco) (ml)
Inicial	0,0588	0,05
1 - 9	0,0526	0,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55: Volumen de ácido clorhídrico gastado en la titulación

N° de muestra	V _(HCl-Tmuestra) (ml)
Inicial	10,67
1	11,54
2	12,72
3	12,63
4	12,45
5	12,66
6	10,81
7	11,86
8	12,64
9	10,44

Fuente: Elaboración propia

6.1.7.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial.

Determinación del nitrógeno en porcentaje:

$$\%N = \frac{(V(HCl - T \text{ muestra}) - V(HCl - T \text{ blanco})) * N(HCl) * A(N) * 100}{m(\text{muestra})}$$

$$\%N = \frac{(10,67 - 0,05) * 0,0588 * 14 * 100}{1013,5} = 0,86\%$$

6.1.7.3. Resultados

Tabla 56: Resultado de nitrógeno total

N°	Nitrógeno total (%)
Inicial	0,86

1	0,82
2	0,93
3	0,90
4	0,85
5	0,91
6	0,79
7	0,86
8	0,91
9	0,73

Fuente: Elaboración propia

6.1.8. Determinación de sodio y potasio

6.1.8.1. Datos

Tabla 57: Masa de la muestra de suelo en miligramos para determinación de sodio y potasio

N°	m(muestra) (g)
Inicial	5,0022
1	5,0122
2	5,0144
3	5,1188
4	5,0886
5	5,0081
6	5,0228
7	5,0019
8	5,0930
9	5,0656

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58: Diluciones realizadas para la determinación de sodio y potasio

N°	Determinación de Na	Determinación de K		
	Dilución (ml/ml)	1ra dilución (ml/ml)	2da dilución (ml/ml)	3ra dilución (ml/ml)
Inicial	30/100	30/100	20/100	20/100
1	30/100	30/100	20/100	30/100

2	50/100	50/100	20/100	10/100
3	30/100	30/100	20/100	20/100
4	30/100	30/100	20/100	20/100
5	-----	30/100	20/100	50/100
6	50/100	50/100	20/100	10/100
7	40/100	40/100	20/100	20/100
8	25/100	25/100	20/100	---
9	30/100	30/100	20/100	20/100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59: Lectura de sodio y potasio en el equipo de absorción atómica, en ppm

N°	Concentración Na (ppm)	Concentración K (ppm)
Inicial	0,2684	0,4755
1	0,6535	0,6121
2	0,7659	0,5776
3	0,6435	0,5305
4	0,9687	0,7659
5	0,7842	0,3987
6	0,8274	0,4709
7	0,6269	0,6597
8	1,0712	0,8570
9	0,8280	0,9072

Fuente: Elaboración propia

6.1.8.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial

Por dilución se tiene:

$$C1 * V1 = C2 * V2 \rightarrow C1 = \frac{C2 * V2}{V1}$$

Para el sodio:

$$C1 = \frac{0,2684ppm * 100ml}{30ml} = 0,8947ppm$$

Para el potasio:

Tercera dilución:

$$C1 = \frac{0,4755ppm * 100ml}{20ml} = 2,3775ppm$$

Segunda dilución:

$$C1 = \frac{2,3775ppm * 100ml}{20ml} = 11,8875ppm$$

Primera dilución:

$$C1 = \frac{11,8875ppm * 100ml}{30ml} = 39,6250ppm$$

Calculo de sodio en meq/100g suelo:

$$\frac{0,8947mg Na}{1000000mg suelo} * \frac{1000mg suelo}{1g suelo} * \frac{1mmol Na}{22,9mg Na} * \frac{1meq Na}{1mmol Na} = \frac{0,0039meqNa}{100g suelo}$$

Calculo de potasio en meq/100g suelo:

$$\frac{39,6250mg K}{1000000mg suelo} * \frac{1000mg suelo}{1g suelo} * \frac{1mmol K}{39,1mg K} * \frac{1meq K}{1mmol K} = \frac{0,101meqK}{100g suelo}$$

6.1.8.3. Resultados

Tabla 60: Resultados de sodio y potasio en meq / 100g suelo

N°	Na (meq/100g suelo)	K (meq/100g suelo)
Inicial	0,0039	0,101
1	0,0095	0,087

2	0,0067	0,148
3	0,0094	0,113
4	0,0141	0,163
5	0,0034	0,034
6	0,0072	0,120
7	0,0068	0,105
8	0,0187	0,044
9	0,0120	0,193

Fuente: Elaboración propia

6.1.9. Determinación de fósforo total

6.1.9.1. Datos

Tabla 61: Masa de la muestra de suelo en miligramos para determinación de fósforo total

N°	m(muestra) (mg)
Inicial	200,7
1	209,6
2	213,1
3	216,7
4	225,4
5	211,6
6	214,1
7	206,6
8	212,9
9	221,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62: Diluciones realizadas para la determinación de fósforo

N°	Dilución (ml/ml)
Inicial	30/100
1	20/100
2	20/100
3	20/100
4	20/100

5	20/100
6	20/100
7	20/100
8	20/100
9	20/100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 63: Concentración en ppm y absorbancia de los patrones utilizados para la determinación de fósforo total en la muestra inicial

N° de patrón	Conc. (ppm)	Absorbancia
1	0,1	0,019
2	0,2	0,032
3	0,4	0,058
4	0,8	0,089
5	1	0,112

Fuente: Elaboración propia

Tabla 64: Lectura de absorbancia en la muestra inicial

N°	Absorbancia
Inicial	0,067

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65: Concentración en ppm y absorbancia de los patrones utilizados para la determinación de fósforo total en las muestras 1 al 9

N° de patron	Conc. (ppm)	Absorbancia
1	0,1	0,022
2	0,2	0,038
3	0,4	0,064
4	0,8	0,102
5	1	0,131

Fuente: Elaboración propia

Tabla 66: Lectura de absorbancia de las muestras 1 al 9

N°	Absorbancia
1	0,036
2	0,058
3	0,067
4	0,062
5	0,05
6	0,059
7	0,067
8	0,065
9	0,054

Fuente: Elaboración propia

6.1.9.2. Cálculos

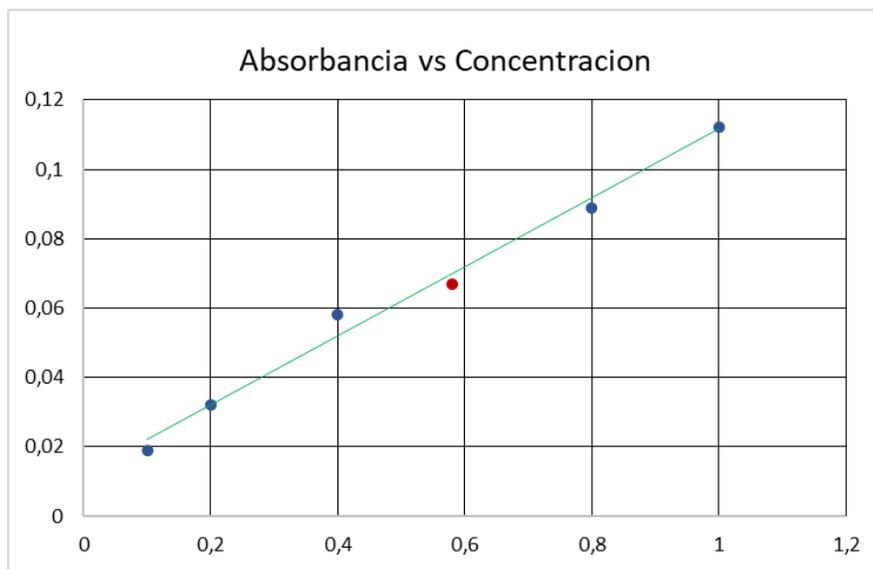
Ejemplo: Muestra inicial.

Regresión lineal: Se realiza la regresión lineal con los patrones utilizados para la muestra inicial.

$$y = 0,0995x + 0,0123 ; Abs = 0,0995Conc + 0,0123$$

$$R^2 = 0,991$$

Figura 24: Grafica de regresión lineal, Absorbancia vs Concentración de fosforo



Fuente: Elaboración propia

Despejando la concentración:

$$Conc = \frac{Abs - 0,0123}{0,0995} = \frac{0,067 - 0,0123}{0,0995} = 0,549 ppm$$

Considerando el factor de dilución:

$$0,549 ppm * \frac{100 ml}{30 ml (muestra)} = 1,83 ppm$$

6.1.9.3. Resultados

Tabla 67: Resultados del fósforo total

N°	P total (ppm)
Inicial	1,83
1	0,97
2	1,92
3	2,31
4	2,09
5	1,58
6	1,96
7	2,31
8	2,22
9	1,75

Fuente: Elaboración propia

6.1.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

6.1.10.1. Datos

Tabla 68: Datos para la determinación de capacidad de intercambio catiónico

N°	Todos los datos se encuentran en (meq /100 g suelo)				
	(Al + H)	Ca	Mg	Na	K
Inicial	2,21	5,99	2,14	0,0039	0,101
1	1,96	7,98	3,62	0,0095	0,087
2	1,45	10,98	1,15	0,0067	0,148
3	1,29	11,98	0,99	0,0094	0,113

4	1,5	12,48	1,48	0,0141	0,163
5	1,86	7,98	1,98	0,0034	0,034
6	1,48	10,48	2,55	0,0072	0,12
7	1,56	10,48	1,73	0,0068	0,105
8	1,4	11,98	5,68	0,0187	0,044
9	1,66	6,49	1,32	0,012	0,193

Fuente: Elaboración propia

6.1.10.2. Cálculos

Ejemplo: Muestra inicial.

$$CIC = (Al + H) + Ca + Mg + Na + K$$

$$CIC = 2,21 + 5,99 + 2,14 + 0,0039 + 0,101 = \frac{10,4449meq}{100g\ suelo}$$

6.1.10.3. Resultados

Tabla 69: Resultados de la capacidad de intercambio catiónico en meq / 100g suelo

N°	CIC (meq /100 g suelo)
Inicial	10,4449
1	13,6565
2	13,7347
3	14,3824
4	15,6371
5	11,8574
6	14,6372
7	13,8818
8	19,1227
9	9,6750

Fuente: Elaboración propia

6.1.11. Relación entre bases intercambiables

En este caso solo se realizó el cálculo para la muestra inicial, porque se requiere estos valores para una interpretación que definió la cantidad de dolomita que se aplicó en el cultivo.

6.1.11.1. Datos

Tabla 70: Datos para la relación de bases intercambiables para la muestra inicial

Todos los datos se encuentran en (meq /100 g suelo)				
Ca	Mg	Na	K	CIC
5,99	2,14	0,0039	0,101	10,4449

Fuente: Elaboración propia

6.1.11.2. Cálculos

Se realizaron los cálculos de acuerdo a lo requerido para la interpretación.

Ejemplo: Para el calcio

Porcentaje de saturación:

$$\%Ca = \frac{Ca(\text{meq} / 100 \text{ g suelo})}{CIC(\text{meq} / 100 \text{ g suelo})} * 100 = \frac{5,99}{10,4449} * 100 = 57,34\%$$

Relación calcio / magnesio:

$$\frac{Ca}{Mg} = \frac{5,99}{2,14} = 2,80$$

Relación calcio / potasio:

$$\frac{Ca}{K} = \frac{5,99}{0,101} = 59,31$$

6.1.11.3. Resultados

Tabla 71: Resultados de relación de bases intercambiables

Relación	Resultado
Ca (%)	57,34
Mg (%)	20,49
K (%)	0,97
Na (%)	0,04
Ca/Mg	2,80
Ca/K	59,31
Mg/Ca	0,36
Mg/K	21,19
K/Ca	0,02

K/Mg	0,05
-------------	------

Fuente: Elaboración propia

6.2. Análisis de la dolomita

6.2.1. Determinación de calcio y magnesio

6.2.1.1. Datos

Tabla 72: Masa de la muestra de dolomita en mg

N°	m(muestra) (mg)
Inicial	105,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 73: Datos para la estandarización de EDTA

N°	Estandarización de EDTA	
	m(CaCO₃) (g)	V(EDTA) (ml)
1	0,0511	22,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 74: Datos para determinar calcio y magnesio en la dolomita

N°	Determinación de calcio y magnesio	Determinación de calcio	Volumen gastado para magnesio
	V(EDTA-Ca-Mg) (ml)	V(EDTA-Ca) (ml)	V(EDTA-Mg) (ml)
1	25,13	22,1	3,03

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.2. Cálculos

Ejemplo:

Estandarización del EDTA:

$$M(\text{EDTA}) = \frac{m(\text{CaCO}_3)}{\text{PM}(\text{CaCO}_3) * V(\text{EDTA}) * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}}$$

$$M(\text{EDTA}) = \frac{0,0515 \text{ g}}{100,09 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 22,2 \text{ ml} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}} = 0,023 \text{ M}$$

Determinación de calcio:

Calculo del porcentaje de calcio:

$$\%Ca = \frac{V(EDTA - Ca) * M(EDTA) * A(Ca)}{m(muestra)} * 100$$

$$\%Ca = \frac{22,1 \text{ ml} * 0,023 \frac{\text{mmol}}{\text{ml}} * 40,08 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} * 2}{105,3 \text{ mg}} * 100 = 38,69\%$$

Determinación de magnesio:

Calculo del volumen de EDTA para el magnesio:

$$V(EDTA - Mg) = V(EDTA - Ca - Mg) - V(EDTA - Ca)$$

$$V(EDTA - Mg) = 25,13 - 22,1 = 3,03 \text{ ml}$$

Calculo del porcentaje de magnesio:

$$\%Mg = \frac{V(EDTA - Mg) * M(EDTA) * A(Mg)}{m(muestra)} * 100$$

$$\%Mg = \frac{3,03 \text{ ml} * 0,023 \frac{\text{mmol}}{\text{ml}} * 24,30 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} * 2}{105,3 \text{ mg}} * 100 = 3,22\%$$

6.2.1.3. Resultados

Tabla 75: Resultado de EDTA estandarizado

N°	EDTA (M) estandarizado
1	0,023

Fuente: Elaboración propia

Tabla 76: Resultados de calcio y magnesio en la dolomita

N°	Ca (%)	Mg (%)
1	33,65	2,80

Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Determinación del poder relativo de neutralización total (PRNT)

6.2.2.1. Datos

Tabla 77: Datos para la determinación del poder relativo de neutralización

$m(\text{muestra})$ (g)	Tamiz	
	Malla	Tamaño de orificios
200	# 60	250 μm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 78: Masa de la cantidad de dolomita que atravesó el tamiz

$m(\text{atravesó malla})$ (g)	$m(\text{no atravesó})$ (g)
188,27	11,73

Fuente: Elaboración propia

Espinoza, J., & Molina, E. (1999) proporcionan los siguientes factores de conversión para materiales de encalado:

$$Ca * 2,5 = CaCO_3$$

$$Mg * 3,5 = MgCO_3$$

6.2.2.2. Cálculos

Calculo del Equivalente químico (EQ):

Según Espinoza, J., & Molina, E. (1999) el equivalente químico de un material de encalado se puede calcular utilizando la siguiente formula:

$$EQ = CaCO_3(\%) + MgCO_3(\%) * 1,19$$

$$EQ = Ca(\%) * 2,5 + Mg(\%) * 3,5 * 1,19$$

$$EQ = 33,65 * 2,5 + 2,80 * 3,5 * 1,19 = 95,79\%$$

Calculo del Equivalente granulométrico (EG):

$$EG(\text{dolomita}) = \frac{m(\text{atraveso malla})}{m(\text{muestra})} * 100$$

$$EG(\text{dolomita}) = \frac{188,27}{200} * 100 = 94,14\%$$

Calculo del poder relativo de neutralización total (PRNT):

$$PRNT = \frac{EG * EQ}{100} = \frac{94,14 * 95,82}{100} = 90,20\%$$

6.2.2.3. Resultados

Tabla 79: Resultados del poder relativo de neutralización total

PRNT (%)
90,20

Fuente: Elaboración propia

6.3. Determinación de la cantidad de dolomita a aplicar por planta

6.3.1. Datos

Espinoza, J., & Molina, E. (1999) afirman que el porcentaje de saturación de aluminio no debe exceder el 25 %. De acuerdo a ello se tomará en cuenta un PRNT del 18 %, para evitar cambios bruscos en el corto tiempo y prevenir la lixiviación por las precipitaciones pluviales,

Tabla 80: Datos para la determinación de cantidad de dolomita a aplicar

Muestra inicial	(Al + H) (meq /100 g suelo)	CIC (meq /100 g suelo)	PRS (%)	PRNT (%)
	2,21	10,44	18	90,20

Fuente: Elaboración propia

Se cuenta los siguientes factores de conversión:

$$1 \text{ Hectarea} = 4 \text{ Cato} = 4400 \text{ plantas}$$

6.3.2. Cálculos

Calculo del porcentaje de la acidez intercambiable:

$$Sat Al^{+3}i(\%) = \frac{(Al^{+3} + H^+)i(meq/100g)}{CIC(meq/100g)} * 100$$

$$Sat Al^{+3}i(\%) = \frac{2,21}{10,44} * 100 = 21,17\%$$

Calculo de la dosis de dolomita en tonelada por hectárea: Este dato se obtendrá bajo el criterio combinado.

$$\text{Dolomita} \left(\frac{\text{t}}{\text{ha}} \right) = 1,5 \frac{(\text{Al} - \text{PRS})(\text{CIC})}{100} * f$$

Dónde:

Al = % de saturación del aluminio actual

PRS = % de saturación de aluminio deseado

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónica

f = factor de calidad del material encalante. (100/PRNT)

$$\text{Dolomita} \left(\frac{\text{t}}{\text{ha}} \right) = 1,5 \frac{(21,18 - 18)(10,44)}{100} * \frac{100}{90,20} = 0,37 \left(\frac{\text{t}}{\text{ha}} \right)$$

Calculo de dolomita en gramos por planta:

$$0,37 \frac{(\text{ton Dolomita})}{(\text{ha})} * \frac{1000(\text{Kg Dolomita})}{1(\text{ton Dolomita})} * \frac{1000(\text{g Dolomita})}{1(\text{Kg Dolomita})} * \frac{1(\text{ha})}{4400 \text{ plantas}}$$

$$\text{Dolomita} \left(\frac{\text{g}}{\text{planta}} \right) = 84,09 \left(\frac{\text{g}}{\text{planta}} \right)$$

6.3.3. Resultados

Tabla 81: Resultado de la cantidad de dosis dolomita

Cantidad de dolomita por planta (g/planta)
84,09

Fuente: Elaboración propia

6.4. Determinación del crecimiento de la planta

6.4.1. Datos

Tabla 82: Datos de la planta antes de aplicar la dolomita

N°	Altura (cm)	Diámetro (mm)	N° de ramas	N° de hojas
1	83,6	11,85	15	103
2	95,0	13,10	12	121

3	90,2	12,15	16	138
4	86,3	12,00	12	105
5	91,1	13,25	17	125
6	89,7	12,75	14	116
7	88,8	13,05	17	148
8	89,4	12,90	13	101
9	85,8	12,35	11	113

Fuente: Elaboración propia

Tabla 83: Datos del crecimiento de la planta a los 15 días después de haber aplicado la dolomita

N°	Altura (cm)	Diámetro (mm)	N° de ramas	N° de hojas
1	83,7	11,90	15	107
2	95,4	13,10	12	125
3	90,5	12,25	17	141
4	86,8	12,00	12	106
5	91,5	13,25	17	129
6	90,0	12,75	14	130
7	88,9	13,35	17	149
8	89,4	12,90	13	112
9	87,0	12,50	11	121

Fuente: Elaboración propia

Tabla 84: Datos del crecimiento de la planta a los 42 días después de haber aplicado la dolomita

N°	Altura (cm)	Diámetro (mm)	N° de ramas	N° de hojas
1	84,1	11,95	15	115
2	96,1	13,20	12	132
3	92,0	12,25	17	152
4	89,6	12,10	14	111
5	93,2	13,30	17	133
6	90,4	12,90	14	141
7	89,7	13,55	17	165
8	90,5	13,00	14	127
9	89,7	12,60	14	135

Fuente: Elaboración propia

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Análisis e interpretación de resultados para la muestra inicial

Se realizó el análisis e interpretación de resultados para la muestra inicial, específicamente para tener un criterio más adecuado y tener parámetros de inicio que permitió realizar una dosificación óptima de dolomita.

En la Tabla 85 se muestra el registro de criterios (referencias) utilizados para la determinación de un encalamiento adecuado:

Tabla 85: Criterios para la interpretación de resultados de la muestra inicial

Parámetro	Referencia	Unidad	Rango	Criterio
pH	Lozano & Lobo (s. f.)		5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
	Castellanos (s. f.)		5,5 – 6,0	En la parte baja de este rango se pueden presentar problemas de acidez
	Villarroel (1998)		5,3 – 5,9	Moderadamente ácido
Conductividad	Lozano & Lobo (s. f.)	mS/cm	< 1	No salino
	Castellanos (s. f.)	dS/cm	< 2	Suelo libre de sales, ideal para cultivos
	Villarroel (1998)	mS/cm	< 0,9	No salino, prospera el cultivo
Textura	Lozano & Lobo (s. f.)	Arena(%)	50 - 0	Franco limoso, textura media
		Limo(%)	87 - 50	
		Arcilla(%)	27 -0	
	Castellanos (s. f.)			Franco limoso

	Villarroel (1998)	Arena(%)	50 - 0	Franco limoso, cuando la arena se reduce mucho comienzan a presentar características físicas poco deseables, son fértiles.
		Limo(%)	88 - 50	
		Arcilla(%)	27 - 0	
Densidad aparente	Lozano & Lobo (s. f.)	g/ml	1,40 - 1,60	No tiene degradación física.
Densidad real	Flores & Alcalá (2010)	g/ml	2,5 - 2,8	Valor adecuado para la densidad real.
Espacio poroso	Rucks et al. (2004)			Relación entre densidad aparente y real (ρ_{ap}/ρ_{real}),
	Lozano & Lobo (s. f.)		0,40 - 0,47	Adecuado para el desarrollo radicular.
Materia orgánica	Lozano & Lobo (s. f.)	%	> 4,0	Alto
	Villarroel (1998)	%	2,1 – 4,0	Moderado, puede presentar deficiencia de nitrógeno.
	Cenicafé (2008)	%	< 8	Deficiencia de nitrógeno.
Aluminio intercambiable	Lozano & Lobo (s. f.)	meq / 100g suelo	0 - 0,50	Bajo
Sodio	Castellanos (s. f.)	%	0 - 5	Libre de sodio
	Villarroel (1998)	meq / 100g suelo	< 0,1	Muy bajo
	(McKean, 1993)	meq / 100g suelo	< 1	Bajo

Potasio	Lozano & Lobo (s. f.)	%	< 0,2	Bajo
		K/Mg	< 0,1	Deficiencia
	Villarroel (1998)	meq / 100g suelo	< 0,2	Muy bajo
	McKean (1993)	meq / 100g suelo	< 0,2	Bajo
Calcio	Lozano & Lobo (s. f.)	%	40 - 60	Medio
		Ca/Mg	2 - 4	Adecuado
		Ca/K	> 30	Deficiencia de potasio
	Villarroel (1998)	meq / 100g suelo	5,1 - 10	Moderado
	McKean (1993)	meq / 100g suelo	4 - 10	Moderado
Magnesio	Lozano & Lobo (s. f.)	%	> 20	Alto
		Mg/K	> 18	Deficiencia de potasio
	Villarroel (1998)	meq / 100g suelo	0,16 - 4	Moderado
	McKean (1993)	meq / 100g suelo	0,5 - 4	Moderado
Nitrógeno	McKean (1993)	%	< 1,5	Muy bajo
	Cenicafé (2008)	%	< 1,5	Deficiencia
Fosforo	Villarroel (1998)	ppm	0 - 5	Muy bajo
	Cenicafé (2008)	ppm	< 30	Muy bajo, para etapa de crecimiento se requiere un valor superior crítico.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realizó el análisis e interpretación adecuado para los resultados del análisis de la muestra inicial (Tabla 86).

Tabla 86: Análisis e interpretación de resultados para la muestra inicial

Parámetro	Unidad	Resultado	Criterio	
pH		5,54	Moderadamente ácido. No se presentan problemas con la acidez intercambiable.	
Conductividad	mS/cm	0,04236	No salino. Suelo libre de sales, adecuado para el cultivo.	
Textura	Arcilla	%	12,59	Clase textural: Franco limoso. Suelo de textura media. Presentan una alta proporción de poros de tamaño medio a fino. Cuenta con una moderada capacidad para retener agua y nutrientes. Tiene un considerable potencial de compactación.
	Limo	%	50,79	
	Arena	%	36,62	
Densidad aparente	g/ml	1,0223		
Densidad real	g/ml	2,5411		
Materia orgánica	%	5,74	Contenido alto de materia orgánica. Suelo ligeramente calcáreo, requiere fuentes de nutrientes.	
Acidez intercambiable	meq / 100g suelo	2,21	Contenido bajo de aluminio intercambiable, no representa un problema para el cultivo. Se debe realizar un manejo adecuado y uso de fertilizantes de manera preventiva.	
Aluminio intercambiable	meq / 100g suelo	0,098		
Sodio	meq / 100g suelo	0,0038	Muy bajo, prácticamente libre de sodio, sin problemas de manejo y no requiere aplicaciones masivas de cal.	
Potasio	meq / 100g suelo	0,016	Muy bajo, el suelo requiere incrementar la cantidad de potasio disponible para el cultivo, esto porque las plantas aún se encuentran en desarrollo.	
Calcio	meq / 100g suelo	5,99	Moderado, se encuentra prácticamente en el límite inferior. Tomar en cuenta que la planta se encuentra en crecimiento.	
Magnesio	meq / 100g suelo	2,14	Moderado, se tiene un contenido adecuado de magnesio.	

Nitrógeno	%	0,86	Bajo, se sugiere suministrar fertilizantes que contengan nitrógeno, porque las plantas se encuentran en periodo de crecimiento y producción.
Fosforo	ppm	1,83	Muy bajo, requiere que se agregue un fertilizante que incremente la cantidad de fosforo, porque las plantas se encuentran en periodo de crecimiento y producción.

Fuente: Elaboración propia

7.2. Efecto de la incorporación de dolomita en el suelo

7.2.1. pH

Según el análisis de varianza para el pH del suelo (Tabla 87), se registró diferencias significativas entre los bloques y para los tratamientos.

Tabla 87: Análisis de varianza para el pH

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	1,0040	0,5020	5,0779	3,93	6,51	*
Bloque	2	0,9060	0,4530	4,5820	3,93	6,51	*
Error experimental	4	0,3954	0,0989				
Total	8	2,3054					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

La prueba de medias Duncan refleja el incremento del pH del suelo (Figura 25) al incorporarse la dolomita, teniendo en cuenta que el primer valor (5,5933) sería el correcto para el cultivo, para la presente investigación se considera como el valor adecuado al segundo (5,9233) y un valor muy elevado el tercero (6,4067).

Figura 25: Prueba de Duncan (5%) para pH



Fuente: Elaboración propia

Marroquín (2003) evaluó el efecto de la dolomita en suelos (1 t/ha) donde no se registró cambios, fue una variación denominada no significativo (NS).

Lima (2020) reportó que en la prueba de significancia de medias de Duncan al (1%) de significancia se formaron tres grupos (A, B y C), determinando que el efecto de la cal, al adicionarse en cualquier proporción significativa, incrementa el valor del pH en todos los casos.

7.2.2. Conductividad eléctrica

En el análisis de varianza (Tabla 88) para la conductividad eléctrica del suelo (Tabla 87), se registró diferencias altamente significativas para los tratamientos. En cuanto a los bloques no se obtuvieron diferencias que influyan.

Tabla 88: Análisis de Varianza para la conductividad eléctrica

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	2163,74 1	1081,87 1	23,091	3,93	6,51	**
Bloque	2	78,082	39,041	0,833	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	187,409	46,852				
Total	8	2429,23 3					

** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia

La prueba de medias de Duncan (Figura 26) muestra dos grupos, reflejando diferencias entre tratamientos e incrementando la conductividad eléctrica. El mejor valor obtenido fue con el tratamiento dos (50,0267 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y con el tratamiento tres (60,0600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), considerando al Testigo (23,3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) como un valor muy bajo.

Figura 26: Prueba Duncan para la conductividad eléctrica



Fuente: Elaboración propia

Lima (2020) indica que la dosificación de cal al suelo incrementa su conductividad eléctrica.

Basado en que la conductividad eléctrica está directamente relacionada con la cantidad de iones, que son los que conducen la electricidad, se esperaba un incremento al adicionar la dolomita. Al evaluar la conductividad eléctrica ante la adición de cal (dolomita) determinó que el encalado permitió mejorar la concentración de las sales en el suelo degradado por acidez. Las dosis incrementaron el valor de la CE en más del 50% del valor inicial de sales presente en el suelo. El mayor incremento se verificó con la dosis determinada por el criterio Kamprath (10,8 t/ha) en un 142,22% más respecto del valor inicial.

7.2.3. Densidad real

El análisis de varianza (Tabla 89) para la densidad real del suelo (Tabla 88), no se tuvieron diferencias significativas para los tratamientos ni para los bloques.

Tabla 89: Análisis de varianza para la densidad aparente

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	0,1143	0,0572	2,0726	3,93	6,51	NS
Bloque	2	0,0001	0,0000	0,0015	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	0,1103	0,0276				
Total	8	0,2247					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Flores & Alcalá (2010) indica que un rango adecuado para medir la densidad real de un suelo puede ir desde 2,5 g/ml hasta 2,8 g/ml.

Se puede decir que, a mayor cantidad de cal disminuye el valor de la densidad. Es decir, son inversamente proporcionales. El valor más adecuado para la densidad real es el que se presenta con el tratamiento dos. El tratamiento uno estaría casi al límite superior del rango adecuado.

7.2.4. Materia orgánica

Al realizar el análisis de varianza (Tabla 90) para la materia orgánica se pudo registrar diferencias altamente significativas en los tratamientos, además se obtuvo una diferencia significativa en los bloques.

Tabla 90: Análisis de varianza para la materia orgánica

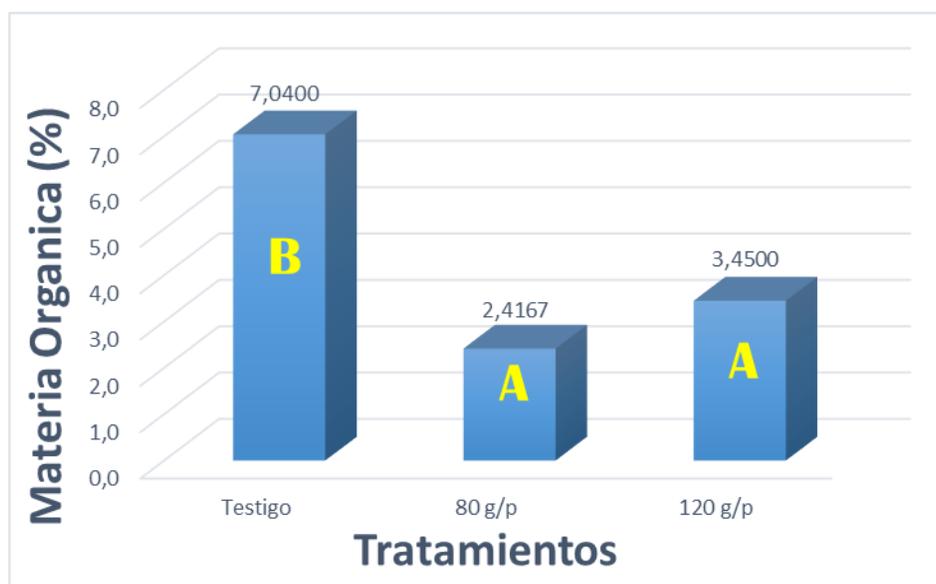
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	35,3310	17,6655	29,8600	3,93	6,51	**
Bloque	2	5,2400	2,6200	4,42860	3,93	6,51	*
Error experimental	4	2,3664	0,5916				
Total	8	42,9375					

** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia

En la prueba de Duncan (Figura 27) se puede ver que se tiene un porcentaje elevado de materia orgánica en el testigo (7,04 %), este valor se reduce en el segundo tratamiento (2,4167 %) y en el tercer tratamiento (3,445%). Se considera a los dos últimos como valores adecuados para el cultivo.

Figura 27: Prueba Duncan (5%) para la materia orgánica



Fuente: Elaboración propia

Según Marroquín (2003) la materia orgánica incrementa al incorporarse la dolomita, aunque el incremento sea no significativo. Atribuye el incremento de materia orgánica a la producción de biomasa, específicamente radicular.

Al evaluar la cantidad de materia orgánica Villarroel (1998) indica que el rango adecuado esta entre 2,1 y 4 %, aunque dependiendo de la etapa en la que se encuentra el cultivo podría presentar deficiencias de nitrógeno.

Lozano & Lobo (s. f.) afirman que un contenido de materia orgánica mayor al 4 % se considera muy elevado.

7.2.5. Acidez intercambiable

En el análisis de varianza para la acidez intercambiable (Tabla 91) se muestra que existen diferencias altamente significativas para los tratamientos. En los bloques no se percibió diferencias significativas.

Tabla 91: Análisis de varianza para la acidez intercambiable

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	0,3038	0,1519	9,0777	3,93	6,51	**
Bloque	2	0,0083	0,0041	0,2470	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	0,0669	0,0167				
Total	8	0,379					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

La prueba de Duncan (Figura 28) muestra dos grupos, reflejando que el valor de acidez intercambiable más elevado se encuentra en el testigo (1,8267 meq/100g suelo), distinguiéndose una disminución en el tratamiento dos (1,4967 meq/100g suelo) y tratamiento tres (1,3967 meq/100g suelo).

Figura 28: Prueba de Duncan (5%) para la acidez intercambiable



Fuente: Elaboración propia

Lima (2020) al realizar el análisis de varianza indica que muestra diferencias altamente significativas entre los tratamientos obteniendo una neutralización de hasta 98,46%. Indica que cualquier dosificación de cal disminuye el contenido de acidez intercambiable del suelo. Determinó que la acidez intercambiable se ve modificada favorablemente al incrementar la dosis de cal. Eso se reflejó en la prueba de Duncan que realizó en su trabajo.

La adición de cal en cantidades significativas siempre tendrá un impacto en contra del Al^{+3} . En la presente investigación se obtuvo una mejor neutralización con el tercer tratamiento. No obstante, se consideran estadísticamente similares los tratamientos dos y tres.

7.2.6. Aluminio intercambiable

En el análisis de varianza (Tabla 92) se muestra que para los tratamientos existen diferencias significativas, mientras se observa que no existen diferencias significativas en los bloques.

Tabla 92: Análisis de varianza para el aluminio intercambiable

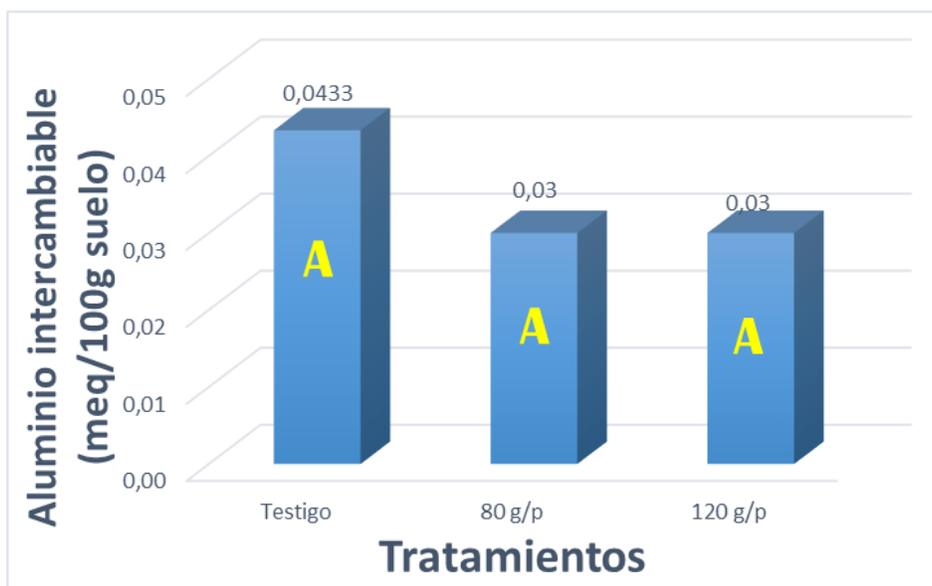
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	0,0004	0,0002	4	3,93	6,51	*
Bloque	2	0,0001	0,0000	1	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	0,0002	0,0000				
Total	8	0,0006					

** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo

Fuente: Elaboración propia

La prueba Duncan (Figura 29) muestra dos grupos, indicando que las cantidades de aluminio intercambiable se reducen ante la incorporación de los tratamientos. En el testigo se nota el valor más elevado (0,0433 meq/100g suelo), mientras que después de la dosificación se puede ver la disminución del aluminio intercambiable (0,03 meq/100g suelo) siendo los valores iguales para el tratamiento dos y tres.

Figura 29: Prueba Duncan (5%) para el aluminio intercambiable



Fuente: Elaboración propia

Lima (2020) al realizar el análisis de varianza indica que muestra diferencias altamente significativas al realizar el encalado de los suelos. El aluminio intercambiable se reduce notablemente ante la incorporación de cal, mientras el tratamiento sea significativo ante el contenido de aluminio intercambiable inicial. Al realizar la prueba de Duncan determino que el grupo que está conformado por los criterios Kamprath (10,80 t/ha), Combinado (7 t/ha) y Van Raij (6,31 t/ha), estadísticamente no son significativamente diferentes, alcanzando similares niveles de neutralización del Al^{+3} .

7.2.7. Calcio intercambiable

Según el análisis de varianza (Tabla 93) para el calcio intercambiable, se muestra una diferencia altamente significativa para los tratamientos. Respecto a los bloques no manifiestan diferencias significativas.

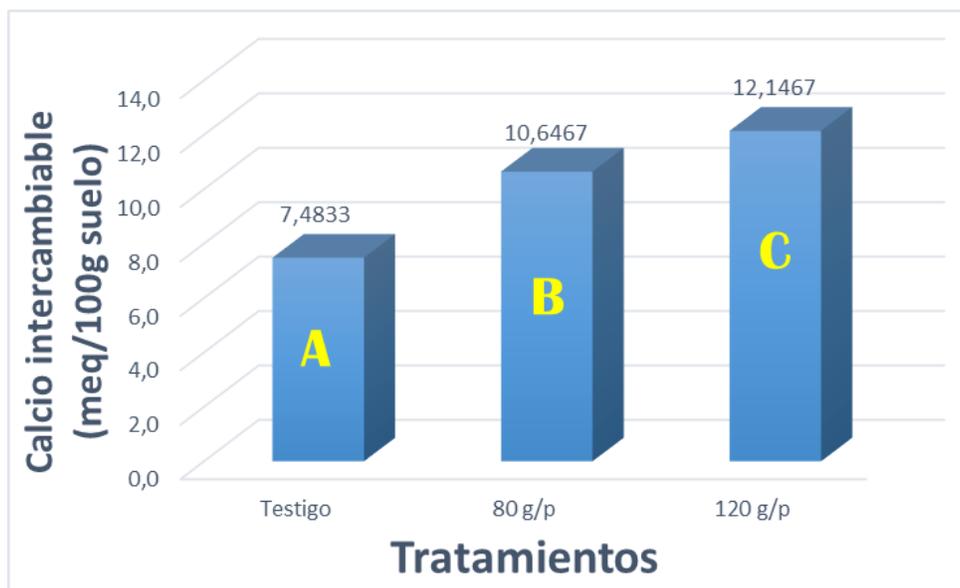
Tabla 93: Análisis de varianza para el calcio intercambiable

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	34,0034	17,0017	72,8609	3,93	6,51	**
Bloque	2	0,8800	0,4400	1,8857	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	0,9334	0,2333				
Total	8	35,8168					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

En la prueba Duncan se muestran tres grupos, en el testigo (7,4833 meq/100g suelo) se registra el valor más reducido. Se nota el incremento de calcio intercambiable para el segundo tratamiento (10,6467 meq/100g suelo) y de igual forma para el tercer tratamiento (12,1467 meq/100g suelo).

Figura 30: Prueba Duncan (5%) para el calcio intercambiable



Fuente: Elaboración propia

Lima (2020) determinó que al realizar el encalado no solo se disminuyó la cantidad de aluminio intercambiable, también se consiguió elevar la cantidad de calcio.

McKean (1993) afirma que el contenido de calcio debería encontrarse entre 4 a 10 (meq/100g suelo). Es un rango considerado como moderado para el calcio intercambiable.

En el trabajo que realizó Marroquín (2003) se refleja el incremento de calcio (1,0 meq/100g suelo) intercambiable al realizar una dosificación de dolomita.

Es evidente que al incorporar la dolomita se incrementará la concentración de calcio en el suelo, ya que se encuentra en su composición.

7.2.8. Magnesio intercambiable

En el análisis de varianza (Tabla 94) para el magnesio intercambiable se muestra que no existen diferencias significativas para los tratamientos ni para los bloques.

Tabla 94: Análisis de varianza para el magnesio intercambiable

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	1,2368	0,6184	0,1619	3,93	6,51	NS
Bloque	2	1,8091	0,9045	0,2368	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	15,2776	3,8194				
Total	8	18,3236					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Lima (2020) determino que al realizar el encalado con dolomita se incrementa la cantidad de bases intercambiables, ya que el magnesio es parte de su composición.

Marroquín (2003) hace referencia al indicar que el incremento de magnesio intercambiable en 1,0 (meq/100g suelo) es de esperarse al realizar una dosificación de dolomita.

McKean (1993) afirma que un rango adecuado para magnesio intercambiable en el suelo está entre 0,5 y 4 (meq/100g suelo).

7.2.9. Capacidad de intercambio catiónico

En el análisis de varianza (Tabla 95) para la capacidad de intercambio catiónico se muestra que no existen diferencias significativas para los tratamientos ni para los bloques.

Tabla 95: Análisis de varianza para la capacidad de intercambio catiónico

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	32,4508	16,2254	3,1900	3,93	6,51	NS
Bloque	2	0,1388	0,0694	0,0136	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	20,3455	5,0864				
Total	9	1833,3475					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Marroquín (2003) afirma que al suministrar dolomita al suelo se incrementa la capacidad de intercambio catiónico, aunque no de manera significativa. Determino que al suministrar dolomita (1 t/ha) se incrementa la CIC en 1 (meq/100g suelo). Por tanto, podemos decir que al suministrar una dosis significativa de dolomita implica el incremento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

7.3. Efecto de la incorporación de dolomita en la planta

7.3.1. Altura de la planta

Según el análisis de varianza para la altura de la planta (Tabla 96) no existen diferencias significativas para los tratamientos ni para los bloques.

Tabla 96: Análisis de varianza para la altura de la planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	14,1622	7,0811	0,4177	3,93	6,51	NS
Bloque	2	1,9089	0,9544	0,0563	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	67,8178	16,9544				
Total	8	83,8889					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Palacios (2012) al evaluar el crecimiento de la planta en 60 días determino que no existe una diferencia estadística significativa para evaluar, ni en tratamientos ni entre grupos. Es decir que el desarrollo de las plantas fue similar para todos los productos y tampoco la dosis en cada producto produjeron efectos significativos en la expresión de esta variable.

Se puede ver que en la presente investigación no existió una variación significativa, si se podría mencionar que existe cierta mejora con el segundo tratamiento.

7.3.2. Diámetro de la planta

En el análisis de varianza para el diámetro de la planta (Tabla 97) no existen diferencias significativas en los tratamientos, tampoco para los bloques.

Tabla 97 Análisis de varianza para el diámetro de la planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	0,9756	0,4878	1,8103	3,93	6,51	NS
Bloque	2	0,5106	0,2553	0,9474	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	1,0778	0,2694				
Total	8	2,5639					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

En su investigación Palacios (2012) manifestó que a los 30 días no existen diferencias estadísticas significativas después de la aplicación de cal. Pero a los 60 días se muestran diferencias significativas en los tratamientos. Asumiendo que existen diferencias entre ellos.

En esta investigación se registraron los últimos datos a los 42 días de haber aplicado la cal, y como se muestra en el análisis de varianza (Tabla 96) y prueba Duncan (Figura 35) no existen diferencias estadísticamente significativas.

7.3.3. Numero de ramas de la planta

Según el análisis de varianza para el numero de ramas de la planta (Tabla 98) no existen diferencias significativas en los tratamientos y tampoco en los bloques.

Tabla 98: Análisis de varianza para el numero de ramas de la planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	1,5556	0,7778	0,1346	3,93	6,51	NS
Bloque	2	0,2222	0,1111	0,0192	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	23,1111	5,7778				
Total	8	24,8889					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Palacios (2012) indica que no existe una variación estadísticamente relevante para esta variable a los 60 días.

Los valores obtenidos en la presente investigación son similares, por lo que se puede afirmar que cualquier tratamiento es igual de bueno para el cultivo, esto a corto plazo (42 días).

7.3.4. Numero de hojas de la planta

El análisis de varianza para el numero de hojas de la planta (Tabla 99) no muestra diferencias significativas para tratamientos y así mismo para los bloques.

Tabla 99: Análisis de varianza para el numero de hojas de la planta

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F _c	F _t		Sig
					0,05	0,01	
Tratamiento	2	597,5556	298,7778	0,8699	3,93	6,51	NS
Bloque	2	304,8889	152,4444	0,4439	3,93	6,51	NS
Error experimental	4	1373,7778	343,4444				
Total	8	2276,2222					
** = Altamente significativo; * = Significativo; NS = No significativo							

Fuente: Elaboración propia

Palacios (2012) en su investigación indico que a los 60 días no existen diferencias significativas para esta variable con la aplicación de cal.

Para el presente proyecto se toma en cuenta que no existen variaciones estadísticamente apreciables, ya que no se tuvieron efectos significativos sobre el número de hojas de la planta. Pero se podría valorar al segundo tratamiento por la leve diferencia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- Se realizó el análisis adecuado para la muestra inicial de suelo, con la que se identificó las condiciones iniciales de acidez en las que se encontraba el suelo del cultivo. Se determinó que el pH (5,54) se encontraba en un rango adecuado, pero si se encontró un problema con la acidez intercambiable (2,21 meq/100g suelo). Además, se pronosticaban precipitaciones pluviales que generan el lavado de bases intercambiables acidificando el suelo. Por lo que se realizó la investigación con un propósito preventivo a los fenómenos naturales recurrentes en la región.
- Los parámetros físicos y químicos del suelo fueron determinados en laboratorio con procedimientos adecuados. Se determinaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (42,36 $\mu\text{S}/\text{cm}$), textura (franco limoso), densidad aparente (1,056 g/ml), densidad real (2,5411 g/ml), materia orgánica (5,74 %), calcio (5,99 meq/100g suelo), magnesio (2,14 meq/100g suelo), sodio (0,0039 meq/100g suelo), potasio (0,101 meq/100g suelo), capacidad de intercambio catiónico (10,4449 meq/100g suelo), nitrógeno total (0,86 %) y fósforo total (1,83 ppm).
- Para determinar el efecto que tendría la dolomita se decidió realizar un análisis estadístico que permita evaluar la modificación de las características del suelo y de la planta, planteando tres tratamientos: El primero denominado testigo (0 g dolomita/planta) que reflejara el comportamiento del suelo y el crecimiento de la planta al no aplicarse cal; el segundo (80 g dolomita/planta) es el tratamiento cercano al teórico (84,09 g dolomita/planta) el cual se utilizó como referencia; el tercero (120 g dolomita/planta) para prevenir los errores como ser pérdidas por lixiviación, vientos, personas que circulan por la parcela, fumigado, entre otras actividades que se realizan en el cultivo. En base a los resultados estadísticos y de laboratorio el mejor tratamiento fue el segundo proporcionando mejores resultados tanto en las características del suelo como en el crecimiento de la planta.

- El efecto de la dolomita fue evaluado en laboratorio y estadísticamente en las características del suelo determinándose que tiene un impacto positivo en la modificación de pH, incrementándose de 5,54 a 5,92 con el segundo tratamiento que será el adecuado para este proyecto, ya que el tercer tratamiento muestra 6,41 como resultado de pH, considerando que se encuentra en un rango muy elevado para el cultivo de café. También se vieron cambios significativos favorables en la conductividad eléctrica (de 42,36 a 50,03 $\mu\text{S}/\text{cm}$), acidez intercambiable (de 2,21 a 1,50 meq/100g suelo) y calcio (de 5,99 a 10,65 meq/100g suelo). En el aspecto físico desde una perspectiva que engloba a la textura y densidad se vieron mejoras que se reflejan en el espacio poroso, que es la relación entre la densidad aparente y la densidad real (0,43). Todo esto considerando al segundo tratamiento que fue el adecuado para la investigación.
- Se determinó que la dolomita no tiene gran impacto en el crecimiento de la planta después de los 42 días de aplicación, estadísticamente se considera no significativo al crecimiento que presentó la planta con los tratamientos. Pero se puede decir que el segundo tratamiento generó una leve variación favorable para el crecimiento de la planta de café catuaí rojo, por ese motivo se considera como el más adecuado en esta investigación.
- El cambio de acidez en el suelo por acción de la dolomita fue evaluado determinando que el mejor tratamiento en estudio fue el de 80 g/planta. Se determinó también que a los 42 días después de la aplicación de dolomita, no influye de forma estadísticamente significativa en el crecimiento de la planta, pero sí presenta mejoras.

8.2. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en la presente investigación sobre el cambio de acidez en el suelo por acción de la dolomita, se recomienda lo siguiente:

- A la Institución Pública Desconcentrada “Soberanía Alimentaria” (IPDSA) promover los análisis de suelos antes de la siembra, durante el crecimiento y posteriormente a la época de cosecha, por la importancia que tiene el contar con los datos de degradación del suelo por acidez como el pH, la acidez

intercambiable propiamente dicha, aluminio intercambiable, nitrógeno, fosforo y bases intercambiables.

- A los propietarios, técnicos y otros servicios que contribuyen al manejo para mejoramiento del cultivo, implementar en su práctica de mantenimiento la determinación de la textura por el método táctil. Con este parámetro se puede reconocer a un suelo que tiene degradación.
- Se recomienda establecer el manejo preventivo en los cultivos, utilizando cal (como en la presente investigación), fertilizantes, abonos y otros que permitan anticipar los fenómenos naturales (sobre todo precipitaciones pluviales) que pueden afectar el desarrollo adecuado de los cultivos, proporcionándoles los macro y micronutrientes al límite superior de su requerimiento.
- En base a la cantidad de parcelas de cultivos de café, se recomienda realizar un estudio de comparación de la degradación del suelo en la misma región, esto para ver la diferencia del nivel de degradación de los suelos a distintas alturas, realizando análisis de laboratorio únicamente de muestras “iniciales” y conforme a ello realizar la interpretación.
- Se sugiere realizar un trabajo de investigación que tenga como objetivo generar un protocolo de análisis de suelos para cultivos para ser presentado y sea avalado por instituciones pertinentes, para tener referencias en estudios posteriores.
- En laboratorio se muestra que se pueden combinar los procesos de determinación de ciertas características del suelo, esto permite desarrollar un trabajo en un tiempo más corto.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C., Barillas, H., & Zelaya, S. (2004). *Estudio de suelos ácidos (pH menor o igual a 5.5) con potencial agrícola, en las zonas de Cojutepeque y Ciudad Arce* [Proyecto de Grado]. Facultad de Química y Farmacia, Universidad de el Salvador. El Salvador.
- Andrades, M., Moliner, A., & Masaguer, A. (2015). *Prácticas de Edafología—Métodos didácticos para análisis de suelos*. Universidad de La Rioja. Rioja, España.
- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego* (Primera edición, Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA). Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú.
- Bernier, R., & Alfaro, M. (2006). *Acidez de los Suelos y Efectos del Encalado*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
- Calva, C. (2016). *Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo ácido de Loreto, Orellana* [Tesis de Grado]. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2007). *Estrés por aluminio en plantas: Reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección*. Revista Colombiana de ciencias hortícolas. Tunja, Colombia.
- Castellanos, J. (s. f.). *Guía para la interpretación del análisis de suelo*. Intagri. México.
- Cenicafé. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. Colombia.
- CIMMYT, (Centro Integral de Mejoramiento de Maíz y Trigo). (s. f.). *Suelos ácidos y alcalinos*. Obtenido de: <http://wheatdoctor.org/es/suelos-acidos-y-alkalinos>
- Condori, W. (2020). *Comportamiento Agronómico de Nueve Cultivares de Café (Coffea Arabica L.) en Vivero con tres Tipos de Sustratos en Chijchipani, Caranavi*. [Tesis de Grado]. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- DGDM, (Dirección General de Desarrollo Minero). (2017). *Perfil de Mercado de la Dolomita*. México.
- Espinoza, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y Encalado de Suelos* (Primera Edición). International Plant Nutrition Institute. Quito, Ecuador.
- FAO, & GTIS. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS)*. Roma, Italia.

- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). *Manual de procedimientos analíticos laboratorio de física de suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- IBCE, (Instituto Boliviano de Comercio Exterior). (2007). *Comercio mundial de productos orgánicos*. Comercio mundial de productos orgánicos. Bolivia.
- Laserna, S., & Laserna, J. (s. f.). *Info sobre AgroEs—Web de Agricultura*. Recuperado 4 de enero de 2022, de <https://www.agroes.es/agricultura/info/>
- Lima, J. (2020). *Criterios de Encalado para la Restauración de Suelos Ácidos, en la Comunidad San Pablo del Municipio de Caranavi* [Tesis de Maestría]. Escuela Militar de Ingeniería. La Paz, Bolivia.
- Lozano, Z., & Lobo, D. (s. f.). *Criterios para la interpretación de los análisis de suelos con fines de diagnóstico de calidad y condiciones limitantes*. Instituto de Edafología, Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- Marroquín, L. (2003). *Efecto de dos materiales encalantes y orgánicos en el rendimiento del maíz (zea mays L.) en siembra directa en un suelo ácido* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Agronomía. Tingo María, Perú.
- McKean, S. (1993). *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Palmira, Colombia.
- MDRyT, (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras). (2019). *Ficha técnica del café*.
Obtenido de:
https://www.cancilleria.gob.bo/coffee/sites/default/files/documentos_pdf/INF%20CAFE%203.pdf
- Mendoza, R., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para el muestreo de suelos* (Primera Edición). Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services. Managua, Nicaragua.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el Muestreo de Suelos*. Lima, Perú.
- Molera, J., & Llitjos, V. (1995). *Estudio de cuatro adaptaciones de métodos de observación y determinación de la textura del suelo*. Enseñanza de las ciencias de la tierra.
- Ochoa, R. (2014). *Diseños experimentales*. La Paz, Bolivia.

- Pajsi, J. (2017). *Evaluación Económica del Sistema de Producción Orgánica en diferentes Años de Poda y Edades de Cafetos (Coffea Arábica L.) en el Cantón de Taipiplaya Municipio de Caranavi* [Tesis de Grado]. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Palacios, N. (2012). *Uso de tres mejoradores de retención de nutrientes en el suelo* [Tesis de Grado]. Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Ambato. Cevallos, Ecuador.
- Programa de Identificación Científica. (2014). *La fenología del café*. Obtenido de: <https://cenicafe.org/es/publications/avt0441.pdf>
- PTDI - GAMC, (Gobierno Autónomo Municipal Caranavi). (2020). *Plan Territorial de Desarrollo Integral, PTDI 2016-2020*. La Paz, Bolivia.
- Rodríguez, P., & Lema, M. (2006). *Encalado de suelos ácidos. Aluminio como criterio. Respuesta de la cebada*. Pontevedra, España.
- Rucks, L., García, F., Kaplan, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de La Republica. Montevideo, Uruguay.
- Salinas, J., & García, R. (1979). *Métodos analíticos para suelos ácidos y plantas*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia.
- SENAMHI. (s. f.). *SENAMHI - Página principal*. Recuperado 6 de enero de 2022, de <http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>
- Teuscher, H., & Adler, R. (1984). *El suelo y su fertilidad*. Editorial Continental, Octava Edición. México.
- Villarroel, J. (1998). *Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio*. Agruco. Cochabamba, Bolivia.
- Zapana, G. (2016). *Determinación de la Aptitud de uso de Suelo en la Comunidad de Karhuiza, La Paz* [Tesis de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia.

ANEXOS



Anexo 1: Preparación de la muestra para el análisis en laboratorio



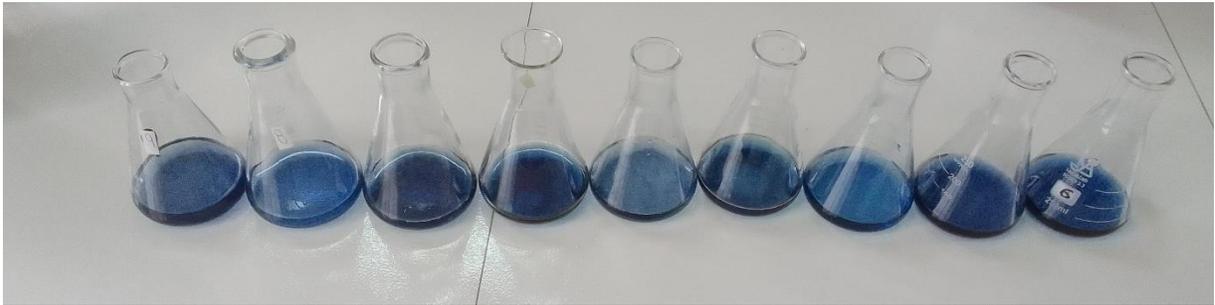
Anexo 2: Muestra pesada en vasos de precipitado (se realiza este paso para la determinación de pH, conductividad, acidez intercambiable, bases intercambiables, fósforo total y nitrógeno total)



Anexo 3: Filtración de la muestra (se realiza este paso para la determinación acidez intercambiable, bases intercambiables, fósforo total y nitrógeno total)



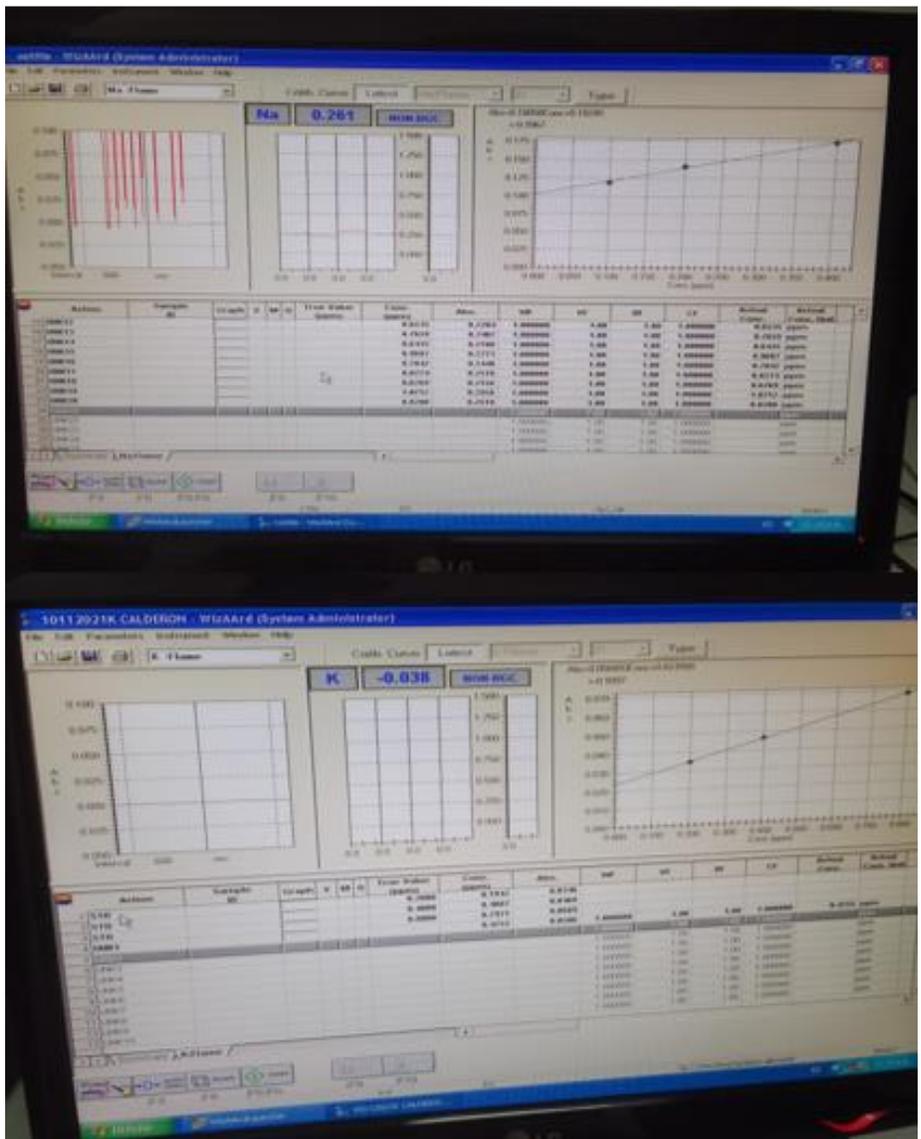
Anexo 4: Determinación de la acidez intercambiable



Anexo 5: Determinación del calcio y magnesio



Anexo 5: Digestión de la muestra (este paso es el mismo para la determinación de nitrógeno total y fósforo total)



Anexo 6: Determinación de sodio y potasio por absorción atómica