

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA DOLOMITA SOBRE LAS
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DEL CULTIVO DE CAFÉ
(*Coffea arabica*) EN LA COMUNIDAD VILLA VICTORIA SEGUNDO,
TERCER BANDO CANTÓN TAIPIPLAYA DEL MUNICIPIO CARANAVI**

MARIA ANGELICA ASTURIZAGA LIMA

La Paz – Bolivia

2024

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA DOLOMITA SOBRE LAS
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DEL CULTIVO DE CAFÉ
(*Coffea arabica*) EN LA COMUNIDAD VILLA VICTORIA SEGUNDO,
TERCER BANDO CANTÓN TAIPIPLAYA DEL MUNICIPIO CARANAVI**

Tesis de grado presentado como requisito parcial
para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo

MARIA ANGELICA ASTURIZAGA LIMA

ASESORES:

Ing. Ph.D. Vladimir Orsag Céspedes

Ing. Msc. Juan José Vicente Rojas

TRIBUNAL REVISOR:

Ing. Ph.D. Roberto Miranda Casas

Ing. Casto Maldonado Fuentes

Ing. Msc. Carlos Eduardo Choque Tarqui

APROBADA

Presidente Tribunal Examinador

La Paz – Bolivia

2024

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico en primera instancia a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para culminar una etapa más en mi vida, a mi linda familia que siempre me apoya en mis decisiones, también a los técnicos del programa café IPDSA y amigos que aportaron con una palabra de aliento para terminar esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme la vida, por haber guiado mis pasos y darme fortaleza en los momentos difíciles.

A la Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, por la enseñanza impartida en mi formación profesional y al plantel docente por los conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera.

A mis asesores: Ph.D. Vladimir Orsag Céspedes, Ing. MSc. Juan José Vicente Rojas
Por asesorarme, por el tiempo dedicado a la revisión del trabajo y por las observaciones acertadas a la presente investigación, atención a mis consultas para la culminación de la presente tesis. Brindado sus conocimientos compartidos y por su paciencia.

Al tribunal revisor, Ing. PhD. Roberto Miranda Casas Ing. Casto Maldonado Fuentes y Ing. M.Sc. Carlos Eduardo Choque Tarqui por brindarme su apoyo y orientación en el desarrollo de la tesis.

Agradecer al IPDSA (Institución Pública Desconcentrada Soberanía Alimentaria) programa café, por las facilidades otorgadas durante la estancia y permitirme realizar el trabajo de campo en sus predios, cuyo apoyo y financiamiento hizo posible el presente trabajo de investigación y además brindarme una fuente laboral.

A mi madre, familiares (hermanas, tíos, tías, primas y primos) que estuvieron ahí en todo momento brindándome su apoyo incondicional, impulsándome para la culminación del presente trabajo.

Finalmente, a los técnicos del programa café, amigos del cantón Taipiplaya y de la Facultad de Agronomía, por todo el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo, con quienes compartí gratos momentos de amistad.

A todos ellos muchas gracias!!

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2. REVISION BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cultivo de café.....	4
2.1.1 Origen.....	4
2.1.2 Especies del Café.....	5
2.1.3 Variedades de Café	5
2.1.4 Producción de café en Bolivia.....	7
2.1.5 Morfología del cultivo.....	8
2.1.6 Requerimientos del cultivo	9
2.1.6.1 Temperatura	9
2.1.6.2 Luz y Sombra	9
2.1.6.3 Precipitación	9
2.1.6.4 Altitud.....	10
2.1.6.5 Humedad	10
2.1.6.6 Vientos.....	10
2.1.6.7 Suelos.....	10
2.1.7 Desarrollo de la planta.....	11
2.1.8 Enfermedades y plagas.....	12
2.1.8.1 Enfermedades	12
2.1.8.2 Plagas.....	13
2.2 Degradación del suelo.....	13

2.3 Acidificación de los suelos	14
2.3.1 Origen de la acidez de los suelos	15
2.3.2 Aluminio intercambiable	15
2.3.3 Absorción del aluminio por la planta	16
2.3.4 Toxicidad por efecto del aluminio en las plantas.....	17
2.3.5 Corrección de la toxicidad por aluminio	18
2.3.6 Efectos del manganeso	18
2.4 El encalado en los suelos	19
2.4.1 Efecto del beneficio del encalado	19
2.4.2 Materiales encalantes.....	20
2.4.3 Calidad del material encalante	22
2.4.4 Duración del efecto de la cal	22
2.4.5 Dosis de cal.....	23
2.4.6 Forma de aplicación de la cal.....	23
2.4.7 Época y momento de aplicación	24
2.4.8 Sobreencalado.....	25
2.4.9 Neutralización de la acidez del suelo.....	25
2.5 Importancia del análisis de suelo	28
2.6 Características físicas del suelo	28
2.6.1 Textura	28
2.6.2 Estructura del suelo.....	29
2.6.3 Densidad aparente	29
2.7 Características químicas del suelo	29
2.7.1 pH.....	29
2.7.2 Materia orgánica	30
2.7.3 Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.)	31
2.7.4 Acidez del suelo.....	32
2.7.5 Calcio del suelo.....	32
2.7.6 Magnesio del suelo.....	33

2.7.7	Nitrógeno del suelo.....	34
2.7.8	Fósforo del suelo	34
2.7.9	Potasio del suelo	35
2.8	Requerimientos nutricionales del cultivo de café	36
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1	Localización.....	38
3.1.1	Ubicación geográfica	38
3.1.2	Características ecológicas.....	39
3.1.2.1	Clima en el área de estudio	39
3.1.3	Topografía.....	39
3.1.4	Suelos	39
3.1.5	Vegetación	41
3.1.6	Características agrícolas	41
3.1.7	Características ecológicas.....	41
3.2	Materiales.....	41
3.2.1.1	Material encalante	41
3.2.1.2	Característica de la cal dolomita.....	42
3.2.2	Material de estudio	42
3.2.3	Materiales de Campo.....	42
3.2.4	Material de Gabinete	42
3.3	Metodología	42
3.3.1	Diseño experimental.....	42
3.3.1.1	Modelo lineal aditivo.....	43
3.3.2	Tratamientos en estudio	43
3.3.3	Dimensiones del área de estudio.....	43
3.3.4	Croquis experimental.....	44
3.3.4.1	Croquis de la distribución de tratamientos	44
3.3.5	Trabajo inicial de gabinete.....	45

3.3.5.1	Recopilación de información secundaria.....	45
3.3.6	Trabajo de campo.....	46
3.3.6.1	Primer muestreo del suelo en estudio.....	46
3.3.6.2	Determinación de la dosis de encalado.....	46
3.3.6.3	Control de malezas.....	47
3.3.6.4	Incorporación de cal dolomita.....	47
3.3.6.5	Marbeteado de plantas.....	48
3.3.6.6	Segundo muestreo de suelo en estudio.....	48
3.3.7	Variables de respuesta.....	48
3.3.7.1	Características de las propiedades físicas y químicas del área de investigación.....	48
3.3.7.2	Datos meteorológicos.....	50
3.3.7.3	Evaluación del efecto de la dolomita sobre las propiedades químicas del suelo	50
3.3.7.4	Evaluación de variables agronómicas.....	51
3.3.8	Trabajo de gabinete (Fase final).....	52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1	Características físicas y químicas del suelo en estudio.....	52
4.1.1	Características físicas.....	52
4.1.2	Características químicas.....	54
4.1.2.1	(pH).....	54
4.1.2.2	Acidez intercambiable.....	55
4.1.2.3	Bases intercambiables.....	56
4.1.2.4	Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	58
4.1.2.5	Materia orgánica y nitrógeno total.....	59
4.1.2.6	Fósforo asimilable.....	60
4.2	Comportamiento climático durante el periodo de evaluación.....	61
4.2.1	Comportamiento de la precipitación en el proceso del encalado.....	61
4.2.2	Comportamiento de la temperatura en el proceso del encalado.....	63

4.3 Efecto de la dolomita en las propiedades químicas del suelo	64
4.3.1 pH del suelo	64
4.3.2 Acidez intercambiable del suelo.....	67
4.3.3 Calcio intercambiable del suelo.....	70
4.3.4 Magnesio intercambiable del suelo.....	72
4.3.5 Potasio intercambiable del suelo	76
4.3.6 Capacidad de intercambio catiónico del suelo	78
4.3.7 Materia orgánica del suelo	80
4.3.8 Fosforo disponible	83
4.4 Efecto del encalado en el cultivo de café	86
4.4.1 Altura de planta (m)	86
4.4.2 Diámetro de tallo (mm)	88
5. CONCLUSIONES	90
6. RECOMENDACIONES.....	91
7. BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonas de producción	7
Tabla 2. Niveles de ph para clasificar el estado nutricional del suelo.....	30
Tabla 3. Niveles de materia orgánica para clasificar el estado nutricional	31
Tabla 4. Niveles de cic para clasificar el estado nutricional del suelo	32
Tabla 5. Niveles de nitrógeno para clasificar el estado nutricional	34
Tabla 6. Niveles de potasio para clasificar el estado nutricional de un suelo.....	36
Tabla 7. Composición química de la cal dolomita.....	42
Tabla 8. Características de la cal dolomita	42
Tabla 9. Descripción de los tratamientos	43
Tabla 10. Detalle del área (parcela) de estudio	43
Tabla 11. Recomendaciones para el encalamiento de los cafetales en la siembra	47
Tabla 12. Descripción de las propiedades físicas	49
Tabla 13. Descripción de las propiedades químicas.....	49
Tabla 14. Características físicas de suelo.....	53
Tabla 15. Análisis de varianza del efecto del encalado en el ph.....	65
Tabla 16. Comparación de medias duncan para la variable ph del suelo.....	66
Tabla 17. Análisis de varianza de la acidez intercambiable	68
Tabla 18. Comparación de medias duncan para la variable acidez intercambiable....	68
Tabla 19. Análisis de varianza para calcio intercambiable del suelo	70

Tabla 20. Comparación de medias duncan para la variable calcio	71
Tabla 21. Análisis de varianza para magnesio intercambiable del suelo.....	73
Tabla 22. Comparación de medias duncan para la variable	74
Tabla 23. Análisis de varianza para potasio intercambiable del suelo	77
Tabla 24. Análisis de varianza para la capacidad intercambiable.....	79
Tabla 25. Comparación de medias duncan para la variable cic del suelo	79
Tabla 26. Análisis de varianza para la materia orgánica del suelo	81
Tabla 27. Comparación de medias duncan para la variable	82
Tabla 28. Análisis de varianza para fosforo disponible del suelo.....	84
Tabla 29. Comparación de medias duncan para fosforo disponible del suelo.....	85
Tabla 30. Análisis de varianza para altura de planta de café	87
Tabla 31. Análisis de varianza de diámetro de tallo para la planta de café	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1	Acidificación del suelo a través de la reacción del Al^{+3} con el agua.....	16
Figura N° 2.	Reducción de la acidez del suelo con la aplicación de la enmienda.....	27
Figura N° 3.	Ubicación geográfica del área de investigación	39
Figura N° 4.	Croquis de la distribución de tratamientos de la aplicación de dolomita en el cultivo de café.....	44
Figura N° 5.	Toma de muestra del suelo en estudio.....	46
Figura N° 6.	Incorporación de las dosis de cal dolomita en la parcela de café	48
Figura N° 7.	pH del suelo en estudio	54
Figura N° 8.	Aluminio intercambiable del suelo en estudio	56
Figura N° 9.	Bases intercambiables del suelo en estudio.....	57
Figura N° 10.	CIC del suelo en estudio	58
Figura N° 11.	Materia organica en estudio	59
Figura N° 12.	Fosforo disponible del suelo en estudio	60
Figura N° 13.	Precipitación pluvial en el cantón de Taipiplaya.....	62
Figura N° 14.	Temperaturas máximas y mínimas en el cantón de Taipiplaya (Noviembre 2021 – Mayo 2022)	63
Figura N° 15.	Variación del pH a los 180 días de aplicación de dolomita.....	65
Figura N° 16.	Variación en la acidez intercambiable a los 180 días	67
Figura N° 17.	Contenido de calcio intercambiable a los 180 días	70
Figura N° 18.	Contenido de magnesio intercambiable a los 180 días	73

Figura N° 19.	Contenido de Potasio intercambiable a los 180 días	76
Figura N° 20.	Contenido de la Capacidad de Intercambio Cationico	78
Figura N° 21.	Contenido de Materia orgánica a los 180 días	81
Figura N° 22.	Contenido de fosforo disponible a los 180 días.....	83
Figura N° 23.	Valores de la altura de planta a los 180 días de la aplicación de dolomita.....	86
Figura N° 24.	Valores del diámetro de tallo a los 180 días de aplicación de	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Resultados de análisis de suelos luego de la aplicación de dolomita	106
Anexo 2.	Datos obtenidos del cultivo de café luego de la aplicación de dolomita	106
Anexo 3.	Muestreo del suelo.....	107
Anexo 4.	Identificación y obtención de la muestra de suelo	107
Anexo 5.	Limpieza del área experimental.....	108
Anexo 6.	Incorporacion de dolomita	108
Anexo 7.	Evaluacion de las variables agronomicas de café.....	109
Anexo 8.	Recolección de muestras de suelo luego de los seis	109

RESUMEN

El cultivo de café (*Coffea arabica*) es una fuente de ingreso para las familias de sector de Caranavi, sin embargo, la acidez del suelo condiciona su desarrollo y rendimiento. El presente estudio de investigación titulado: Evaluación del efecto de la dolomita sobre las propiedades químicas del suelo del cultivo e café (*Coffea arabica*) se realizó en la comunidad Villa Victoria Segundo, Tercer Bando cantón Taipiplaya del municipio de Caranavi, mediante la aplicación de tres dosis de cal dolomita (tratamientos). El diseño utilizado fue bloques al azar (DBA), con tres repeticiones. Para este fin antes de aplicar dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) se realizó un análisis preliminar del suelo de cuarta hectárea, con árboles de café en etapa de desarrollo ya establecidas hace un año en parcela de la variedad Catuaí rojo. El suelo en estudio presentó textura franco arcilloso con un pH de 4,75 calificado como fuertemente ácido y 35,74% de saturación de Al^{3+} intercambiable catalogado como alto. Los contenidos de calcio, magnesio intercambiable presentaban valores de 0,85 y 0,30 meq/100gS. Para la aplicación de las dosis se utilizó los criterios de CENICAFE (Centro Nacional de investigaciones de café), 2007. Los tratamientos fueron: T1 (testigo), T2 (100 g/planta) y T3 (120 g/planta) lo que equivale a 440 y 520 kg/ha de cal dolomita respectivamente. La investigación determinó una incidencia significativa a los 180 días del encalado sobre las características químicas del suelo. El pH se incrementó a medida que las dosis de la enmienda fueron mayores. El mejor tratamiento fue el T3 (528kg/ha) de cal dolomita que permitió subir el pH a 6,24, respecto del valor inicial. Además, logró reducir la acidez intercambiable ($\text{Al}+\text{H}$) a 0,53 meq/100gS, con 3,45%, de saturación de Al^{3+} intercambiable, generando las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por otro lado, se elevaron los valores de calcio y magnesio intercambiable en 4,30 y 4,63 meq/100gS respectivamente situados en intervalos de exigencia adecuados para el cultivo de café. También se observó que las dosis aplicadas si influyen en: el contenido de capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, fosforo disponible. Sin embargo, no influyen para potasio intercambiable del suelo, altura de planta y diámetro de tallo debido al tiempo de monitoreo.

ABSTRAC

The cultivation of coffee (*Coffea arabica*) is a source of income for families in the Caranavi sector, however, the acidity of the soil conditions its development and performance. The present research study entitled: Evaluation of the effect of dolomite on the chemical properties of the soil of the coffee crop (*Coffea arabica*) was carried out in the Villa Victoria Segundo community, Tercer Bando canton Taipiplaya of the municipality of Caranavi, through the application of three Dolomite lime dosage (treatments). The design used was randomized blocks (DBA), with three repetitions. For this purpose, before applying dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), a preliminary analysis of the soil of a quarter hectare was carried out, with coffee trees in the development stage already established a year ago in a plot of the Catuaí Rojo variety. The soil under study presented a clay loam texture with a pH of 4.75 classified as strongly acidic and 35.74% saturation of exchangeable Al^{3+} classified as high. The contents of calcium and exchangeable magnesium had values of 0.85 and 0.30 meq/100gS. For the application of the doses, the criteria of CENICAFE (National Center for Coffee Research), 2007 were used. The treatments were: T1 (control), T2 (100 g/plant) and T3 (120 g/plant) which is equivalent to 440 and 520 kg/ha of dolomite lime respectively. The research determined a significant impact 180 days after liming on the chemical characteristics of the floor. The pH increased as the doses of the amendment were higher. The best treatment was T3 (528kg/ha) of dolomite lime, which allowed the pH to rise to 6.24, compared to the initial value. Furthermore, it managed to reduce the exchangeable acidity ($\text{Al}+\text{H}$) to 0.53 meq/100gS, with 3.45% saturation of exchangeable Al^{3+} , generating adequate conditions for the growth and development of the plants. On the other hand, the values of calcium and exchangeable magnesium were raised to 4.30 and 4.63 meq/100gS respectively, located in adequate requirement intervals for coffee cultivation. It was also observed that the doses applied do influence: the content of cation exchange capacity, organic matter, available phosphorus. However, they do not influence soil exchangeable potassium, plant height and stem diameter due to the monitoring time.

1. INTRODUCCIÓN

Bolivia se caracteriza por ser un país cafetalero, sin embargo, su volumen de producción es poco significativo a nivel mundial, se estima, que existen alrededor de 23.000 familias involucradas en el proceso de producción de café, con una superficie de plantación cercana a las 25.000 hectáreas, de las cuales un 95% se encuentran en la región de los Yungas y Norte del Departamento de La Paz por sus condiciones climáticas favorables altitud sobre el nivel del mar y otros.

Si bien el departamento de La Paz ocupa el primer lugar en la producción nacional de café (96.4%), su crecimiento ha sido lento en los últimos 30 años, su producción ha decaído debido a la aparición de plagas y enfermedades, la baja fertilidad de los suelos, debido a que el suelo no cuenta con el establecimiento de sistemas agroforestales y la falta de renovación de los cultivos antiguos y el escaso apoyo de parte de las instituciones públicas y privadas (CIPCA, 2012).

Sin embargo, experiencias realizadas en diversas zonas tropicales cafetaleras indican, que para mejorar la fertilidad de los suelos ácidos y recuperar la producción de los cafetales es necesaria la aplicación de enmiendas calcáreas. Los estudios realizados sobre el uso de especies de sombras muestran que estas no solo permitieran la producción del café, sino además la conservación de los suelos.

Jackson (1967), menciona que en los suelos ácidos se encuentran frecuentemente pequeñas cantidades de magnesio (Mg) en relación con el calcio (Ca), así al agregar cal agrícola a los suelos genera un desequilibrio en relación de calcio (Ca) /magnesio (Mg) por lo tanto se puede observar deficiencias de Mg en los cultivos recomendando la aplicación de dolomita.

Los suelos de las regiones tropicales y subtropicales son naturalmente ácidos, característica que tiene su origen entre varios factores a las intensas precipitaciones pluviales, muy común en estas regiones donde en el transcurso del tiempo sufren no solo el lavado de sus partículas de arcilla y limo (degradación física) sino también de los

diferentes nutrientes (cationes y aniones) importantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Orsag, 2010).

La acidificación del suelo disminuye en primer lugar la disponibilidad de algunos macronutrientes primarios como el N, P, K, secundarios como el Ca, Mg, S y micronutrientes como B, Cu y Mo. Por otro lado afecta algunas propiedades físicas del suelo (disminución de la agregación, permeabilidad y porosidad) y el crecimiento de las plantas.

Otro resultado de la acidificación de los suelos tropicales es la toxicidad por la presencia marcada de elementos como el aluminio y manganeso que afectan principalmente la producción agrícola. El aluminio no solo daña al sistema radicular de los cultivos (interfiriendo la división celular), sino que impide la absorción y el traslado del calcio y magnesio hacia la parte aérea de la planta (Sánchez, 1981).

1.1 Justificación

En las regiones sub-tropicales y tropicales, la disponibilidad de macro y micro nutrientes minerales para las plantas, depende del nivel de acidez del suelo (pH) convirtiéndose en una de las variables edáficas que limitan el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales, bajo esas condiciones el Al^{+3} intercambiable alcanza niveles tóxicos para las plantas, las mismas en consonancia con el suelo ven seriamente afectadas el medio en el cual se desarrollaron, las plantas ya no crecen se reduce la diversidad, no solo de las plantas, sino también de los microorganismos que viven en el suelo junto a las raíces de las plantas, afectando principalmente las funciones ambientales del suelo, siendo necesario iniciar con su restauración.

Ante esta situación resulta una tarea urgente, prestar atención y explorar diferentes alternativas que promuevan el manejo adecuado y sostenible de este recurso natural y la producción de este cultivo.

Entre las diferentes alternativas técnicas para restaurar suelos degradados por la acidez, resalta el del encalado. Distintos autores han propuesto diferentes criterios o métodos

para determinar la cantidad de cal a ser aplicada a los suelos, así como de los materiales de encalado,

La Institución Pública Desconcentrada Soberanía Alimentaria IPDSA mediante la ejecución del Proyecto “Implementación del Programa de Fortalecimiento de la Caficultura a nivel Nacional” pretende Incrementar la producción y productividad del cultivo de café; con énfasis en la producción orgánica considera que las enmiendas orgánicas como la cal dolomita podrían ayudar a disminuir la acidez y reducir la toxicidad del aluminio ya que busca de alguna manera mejorar la fertilidad de los suelos, mejorar sus condiciones químicas y físicas, dando lugar a un mejor medio, donde las plantas puedan producir mejor, con lo cual se lograría alcanzar mejores ingresos para las familias productoras de café e incrementar el rendimiento del cultivo (MDRyT,2021).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la dolomita sobre las propiedades químicas del suelo del cultivo de café (*Coffea arabica*) en la comunidad Villa Victoria segundo, tercer bando Cantón Taipiplaya del Municipio Caranavi

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Describir las características físicas y químicas del suelo en estudio
- ✓ Evaluar el comportamiento climático del área de estudio
- ✓ Evaluar el efecto de la dolomita en las propiedades químicas del suelo
- ✓ Evaluar el efecto de la dolomita en el crecimiento del cultivo de café

2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultivo de café

2.1.1 Origen

Cuba (2006), menciona que el café (*Coffea arabica*) originalmente crecía en las mesetas de Etiopía, de ahí pasó a Yemen entre los siglos XIII y XIV, a la Guayana Holandesa en el siglo XVIII, posteriormente a las Antillas, Sumatra y a la isla de Reunión. Fue introducida al Brasil en 1727 y a fines del siglo XVIII se encontraba distribuida en toda América Central y México.

Según Barrientos (2011), el café es originario de África de las regiones de Etiopía, Kenia y Tanzania, donde las primeras plantaciones estaban ubicadas entre los 1.200 a 1.800 metros de altura, a Bolivia fue traído por los españoles en la época de la colonia.

2.1.2 Clasificación taxonómica

Según USDA-NCRS (2021), señala que el cultivo del café tiene la siguiente clasificación taxonómica:

Reyno: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Sub Clase: Asteridae
Orden: Rubiales
Familia: Rubiaceae
Género: Coffea
Especie: Coffea arabica L.
Nombre común: café

2.1.3 Especies del Café

Castañeda (2000), señala que a nivel mundial existen dos especies comerciales:

Coffea arabica: Conocido como “Arábica” representa el 68% de la producción mundial. Las plantas se desarrollan en forma de arbusto y se han adaptado ampliamente a las condiciones climáticas y suelos de las áreas tropicales y subtropicales en lugares desde los 600 msnm hasta 2000 msnm.

Coffea canephora: Conocida como “Robusta” representa el 32% de producción mundial. Las plantas se desarrollan en forma de árboles y crecen desde el nivel del mar hasta los 800 msnm.

2.1.4 Variedades de Café

Entre las numerosas variedades de *Coffea arabica* L. se ha prestado especial atención a aquellas de alta calidad y productividad, sin embargo, las últimas tres décadas la caficultura también viene considerando como característica importante la resistencia a enfermedades como la “roya amarilla del café” a la cual la variedad típica no es resistente (Monroig, 2000).

- **Café típica o arábica**

Conocida también como variedad Nacional y en los Yungas como variedad Criolla es la más importante en términos económicos especialmente para el continente americano; su producto es de calidad superior en aroma y sabor. La planta es de porte alto, el tronco es flexible, las ramas tienen ángulo abierto, poca ramificación secundaria, hojas elípticas y frutos rojos. El grano o semilla es algo más alargado que de las otras variedades (Figuerola, 1996).

- **Caturra**

Es originario de Brasil, mutante de la variedad Bourbon. Es una de las variedades más conocidas en nuestro medio, por la facilidad de su cosecha en relación a la Típica, por lo que se ha difundido rápidamente entre los agricultores. Se diferencia de ésta por ser una planta de porte pequeño; además por tener entrenudos cortos, hojas anchas, ramificación secundaria abundante, brote terminal verde y frutos de color rojo o amarillo. Una característica es que comienza a producir en menos tiempo que las otras variedades,

pero presenta muchos frutos vanos o vacíos, con una alta producción y buena calidad, pero que requiere de una amplia atención y fertilización (Monroig, 2000).

- Mundo Novo

Parece ser un cruce entre la variedad Bourbon y café Sumatra originaria de Brasil. Las plantas de esta variedad presentan características parecidas al Bourbon. Es una variedad vigorosa y productiva, con marcada tendencia a producir un alto porcentaje de frutos con una sola semilla (caracolillo). Esta variedad es especialmente valiosa, debido a que puede sembrarse a distancias más cortas que las variedades de porte alto, por lo cual se aumenta la densidad de siembra y por consiguiente la producción por unidad de superficie. El menor tamaño de sus plantas facilita además las labores de cosecha (Monroig, 2000).

- Catuaí

Figuroa (1996), afirma que es originaria de Brasil, proviene de cruzamientos entre las variedades Caturra y Mundo Novo. Sus características son similares a las del Caturra, pero es más vigoroso. Por su alta producción se cultiva comercialmente en Brasil, las progenies más sobresalientes son de fruto rojo y amarillo, algunos de coloración anaranjado, es una de las variedades que mejor se ha adaptado en los Yungas, por lo que tiene cierta preferencia entre el grupo de las variedades de porte menor.

Cicafe (2011), señala las siguientes características:

- Tamaño promedio es de 2.25 metros
- Los frutos son resistentes al viento y a la lluvia
- Requiere de fertilización y cuidado suficiente.
- Las condiciones óptimas de altitud van desde 600 a 1000 msnm
- El rendimiento del grano es bueno, así como la calidad de la bebida
- Densidades no mayores a 5 000 plantas por hectárea (2,0 metros entre hileras y 1,0 metros entre plantas).

- Catimor

Se origina del cruzamiento del Caturra rojo con el Híbrido de Timor. El café Catimor se caracteriza por su porte bajo, su tronco de grosor intermedio, su considerable número de ramas laterales, formando una copa medianamente vigorosa y compacta. Además de su productividad relativamente alta, muestra un comportamiento favorable con respecto a la enfermedad de la roya, por lo menos a las razas de hongo *Hemileia vastatrix* que proliferan en la caficultura andina (Figueroa, 1996).

2.1.5 Producción de café en Bolivia.

a) Principales Zonas Productoras de Café

En la tabla 1 se puede observar las principales zonas cafetaleras del país, se encuentran en los municipios de Caranavi, Nor y Sud Yungas del Departamento de La Paz, los cuales concentran el 95% de la producción de café a nivel nacional, seguido por Santa Cruz mostrándose un crecimiento cada vez mayor.

Tabla 1. Zonas de producción

Departamento	Provincias	Comunidad
La Paz (95 %)	Caranavi	Caranavi
	Nor Yungas	Coroico, Coripata
	Sud Yungas	La Asunta Chulumani, Irupana
Santa Cruz (3%)	Franz Tamayo	Apolo
	Inquisivi	Circuata, Licoma, Cajuata
	Larecaja	Larecaja
	Ichilo	Buena Vista
Cochabamba (1%)	San Ignacio de Velasco	San Ignacio de Velasco
	Sara	Sara
	Chapare	Chapare
Tarija (0.5%)	Arce	Bermejo
Beni (0.5%)	Vaca Diez	Vaca Diez

Fuente: Elaborado en base a INE (2012).

2.1.6 Morfología del cultivo

La morfología del café presenta ciertas diferencias entre variedades y según el ambiente en el que se desarrollan, sin embargo, de manera general pueden mencionarse las siguientes características:

Cicafe (2011), señala la siguiente morfología del cultivo:

Raíz, el café tiene una raíz principal pivotante, porque nace de una semilla con numerosas raíces secundarias. La parte más importante son las raicillas, que son las encargadas de absorber el agua y los nutrientes para la planta, la raíz extendiéndose de 45 a 60 cm de profundidad.

Tallo y ramas, generalmente el árbol de café se compone de un solo tallo o eje central, nudos y entrenudos. Poseen dos tipos de brotes, pueden ser tanto ortotrópicos, que crecen verticalmente y comprenden el tallo principal y los chupones; como plagiotrópicos, que crecen horizontalmente y comprenden las ramas primarias, secundarias y terciarias.

Hojas, son el órgano fundamental porque en ella se realizan los procesos de fotosíntesis, transpiración y respiración, son de forma elíptica, opuestas, peciolo corto, coriáceas, verde brillante en el haz, algo más pálida en el envés y con nervaduras salientes. El color y tamaño varía según las especies, los bordes son ondulados, están rodeados por dos estípulas agudas que crecen en los nudos del tallo.

Flores, son hermafroditas, indican la producción y distribución de la cosecha a lo largo del año, se localizan en los nudos de las ramas hacia la base de las hojas en grupos de 4 o más. La cantidad de flores presentes en un momento determinado depende de la cantidad de nudos formados previamente en cada rama.

Fruto, se desarrolla un fruto llamado 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).

Semilla, son oblongas, plano convexas, representan del 35 al 38% del fruto del café, están constituidas por el endocarpio o pergamino, una película plateada o perisperma, endospermo cotiledón o embrión.

2.1.7 Requerimientos del cultivo

Solórzano (2005), menciona que las condiciones edafoclimáticas establecen una serie de actividades considerando el sistema del suelo, planta y clima que le permitirán obtener producciones de buena calidad y cantidad.

2.1.7.1 Temperatura

El promedio anual favorable para el café se ubica entre los 17°C a 23°C para un buen desarrollo. Las bajas temperaturas propician un desarrollo lento y una maduración de frutos tardía, mientras las temperaturas altas aceleran la senescencia de los frutos, disminuyen la fotosíntesis, reducen el crecimiento y producción. Para modificar los efectos de temperaturas altas se debe implementar sombra temporal y permanente (Cicafe, 2011).

2.1.7.2 Luz y Sombra

El cultivo de café se desarrolla mejor con una sombra del 50 % por que la proporción de asimilación neta del café es mayor bajo condiciones de luminosidad moderada que a pleno sol, en términos de duración diaria y por sus variaciones estacionales en el año, durante los meses secos se acumulan entre 200 a 280 horas de brillo solar y en los meses lluviosos de 100 a 150 horas de brillo, haciendo un total de 1500 a 2500 horas al año (Cicafe, 2011).

2.1.7.3 Precipitación

Se considera apropiada para el cultivo una cantidad de lluvia comprendida entre los 1800 y los 2800 mm anuales, con una buena distribución en los diferentes meses del año. Se requieren por lo menos 120 mm al mes. La lluvia excesiva inhibe la diferenciación de las yemas florales; también puede ocasionar deficiencias de nitrógeno por dilución del elemento y reducción del crecimiento de la planta. Esta puede dar lugar a floraciones múltiples e irregularidades en la cosecha y la caída del fruto (Arcila, 2007).

2.1.7.4 Altitud

El café se puede cultivar en un rango altitudinal de 400 a 2000 msnm. La zona altitudinal que ofrece las mejores condiciones para obtener café de buena calidad está entre 1200 a 1800 msnm. El grano producido en altura es de mayor tamaño, rendimiento, mejor calidad, más cuerpo, aroma y acidez que el de áreas bajas (Cicafe, 2011).

2.1.7.5 Humedad

Lo más ideal para la producción de café es inferior al 85 % de humedad relativa, si la humedad relativa excede se afecta la calidad del café y se favorece la incidencia de enfermedades fúngicas. (Proliferación de la roya) (Cicafe, 2011).

2.1.7.6 Vientos

Fuertes vientos provocan alta defoliación caída de flores y frutos, asimismo favorecen la incidencia de enfermedades, por lo cual el rango óptimo de velocidad del viento para el café es de 5 a 15 Km/h. Se deben escoger terrenos protegidos del viento o establecer barreras rompevientos para evitar la acción de este (Cicafe, 2011).

2.1.7.7 Suelos

La textura y profundidad del suelo si tienen una gran importancia tanto el suelo como el subsuelo. Son preferibles los suelos fértiles, rico en nutrientes particularmente en potasio y con bastante materia orgánica, porosos profundos con buen drenaje y medianamente ácidos con pH de 5.0 a 5.5.

La condición óptima de suelo para el cultivo de café orgánico es con textura franca; pero se adapta a suelos desde franco Arcillosos hasta franco Arenoso, con pendiente suave del cinco a 12 %. Considerando además sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Arcila, 2007).

La aireación juega un rol determinante, por lo que se considera suelo apropiado aquel que presenta un 60 % de espacio poroso del cual un tercio es ocupado por aire cuando el suelo está húmedo. El subsuelo puede contener más arcilla, pero la libre expansión del sistema de raíces no debe verse impedida por falta de aireación (Figuroa, 1996).

El café posee un sistema radicular que alcanza una gran extensión; en los suelos compactos o poco profundos, el tallo queda corto y las raíces no se extienden más que en los horizontes superficiales, en un espesor que raramente sobrepasa los 0.30m.

2.1.8 Desarrollo de la planta

Lizarro y Rodas (2010), mencionan las siguientes etapas de desarrollo del cultivo de café.

Propagación, la propagación del café se efectúa mediante semillas, teniendo que ser estas uniformes en tamaño, forma y color del pergamino, la técnica de propagación que se realiza es en viveros, también se puede multiplicar por estacas por injertos y acodos.

Semilla, la semilla madura, sana y bien constituida puede germinar desde su cosecha, si es colocado en condiciones satisfactorias de medio ambiente; humedad, aereación y temperatura de 25 a 30 °C.

Selección de plantas, la selección de plantas madre puede resultar de registros individuales de varios años de producción, o de registros de por lo menos de dos años de producción, con el propósito de asegurar mayor integridad genética con respecto a las plantas seleccionadas.

Trasplante, el trasplante del vivero al terreno se realiza al inicio de la época de lluvias (diciembre-enero), tomando en cuenta que el suelo tenga buen drenaje, sea fértil, y un contenido suficiente de materia orgánica trasplantándose solo plántulas vigorosas, para lo cual se cavan hoyos de 30.30.40 cm, en diagonal cuadrado, tres bolillos y en curvas a nivel con dos meses de anticipación. Para la elección final de lugares para establecer los cafetales, a su vez, tiene que sustentarse en criterios técnicos, económicos y sociales, citando entre estos:

- La distancia del cafetal a los centros poblados donde se obtiene mano de obra, al lugar donde se ha instalado el pre beneficio y a los mercados.
- La existencia y estado de las vías de comunicación y la construcción de caminos internos, especialmente en terrenos con topografía accidentada.
- Disponibilidad de agua para todas las labores de producción y beneficio del Café.

Densidad de plantación, el distanciamiento adecuado depende de varios factores, como variedad, altitud, clima y tipo de manejo. En un sistema orgánico, con sombra diversificada, la densidad de plantas no debería ser mayor a 2500 a 3000 plantas por hectárea, con un distanciamiento de aproximadamente dos por dos metros.

2.1.9 Enfermedades y plagas

Según ANACAFE (2019), las principales enfermedades de mayor importancia económica del café son:

2.1.9.1 Enfermedades

- Roya del café: es ocasionada por un hongo conocido como *Hemileia vastatrix*, el cual sobrevive en la misma planta. Los primeros síntomas pueden ser observados en las hojas, como pequeños puntos cloróticos o amarillo pálido, de 1 mm a 3 mm de diámetro, luego se agrandan hasta alcanzar 2 cm observándose pústulas de aspecto de polvillo color amarillo o anaranjado que constituyen las esporas del hongo.

- Mancha de hierro: es causada por el hongo *Cercospora coffeicola*. Afecta el café durante todos sus estados de desarrollo, desde las hojas cotiledonares hasta los frutos, aparece tanto en la época seca en donde hay exceso de insolación y falta de sombra como en época lluviosa, cuando se caracteriza por presentar manchas oscuras y grandes en las hojas.

- Ojo de gallo del café: ocasionada por el hongo *Mycena citricultor*, se manifiesta en lugares donde hay alta humedad y temperatura, puede ser reconocida en el campo por manifestar manchas redondas en las hojas de aproximadamente 0,5 cm de diámetro, de coloración blanquecina. Posteriormente, hay caída de hojas con la consecuente reducción de la producción.

- Antracnosis causado por *Colletotrichum coffeaunum*; que ataca generalmente a las hojas.

2.1.9.2 Plagas

- Broca del café (*Hypothenemus hampei* Coleoptera: Scolytidae): es un gorgojo del tamaño de la cabeza de un alfiler por lo que no es fácil distinguirla a simple vista. Ataca el fruto del café en cualquier estado de desarrollo, es decir: frutos verdes maduros y sobre maduros.

Es la plaga de mayor importancia económica que afecta al cultivo del café. Entre los principales daños que causa se registran las caídas de las cerezas, los frutos perforados pueden ser atacados fácilmente por enfermedades, además, cuando la broca ataca frutos maduros y pintones se produce café de poco peso o café vano (Inatec, 2016).

- Minador (*Perileucoptera coffeella*): es la larva de una mariposa pequeña que ataca la hoja en la cual hace galerías o minas (InfoAgro, 2019).

Su ataque es más grave en condiciones de alta humedad y altas temperaturas, es decir en cafetales situados por debajo de 1300 m.s.n.m., en zonas con humedades relativas entre 75% y 85%, así como temperaturas entre 22 y 25°C afectando plantaciones de café de todas las edades a plena exposición solar y bajo sombrero regulado (Inatec, 2016).

- Nematodos (*Meloidogyne* sp., *Pratylenchus coffea*, *Rotylenchulus* sp.): son organismos microscópicos que tienen forma de gusanos delgados, alargados, cilíndricos e incoloros. Atacan el cuello y las raíces del café, produciendo atrofas en éstos. Entre los síntomas se observan nudos en las raíces atacadas, los árboles muestran amarillamiento y crecimiento reducido de manera que no reaccionan favorablemente a la aplicación de abonos (Inatec, 2016).

2.2 Degradación del suelo

De acuerdo con Oldeman (1998), citado por Cotler *et al.*, (2007), la degradación del suelo se puede dividir en dos grandes categorías. La primera comprende el desplazamiento del material edáfico (erosión hídrica y eólica). La segunda es el resultado de un deterioro interno en sus propiedades físicas, biológicas y químicas esta última engloba la pérdida de nutrientes, la contaminación, la acidificación destrucción de los minerales de las arcillas, la meteorización de los componentes del suelo permite la liberación de iones Al^{3+}

y la salinización. Estos procesos se encuentran intrínsecamente relacionados entre sí, por ejemplo, el escurrimiento (erosión hídrica) lleva en su seno nutrientes minerales provocando la reducción de la fertilidad (deterioro químico).

Orsag (2010), afirma que luego de unos años de manejo del suelo, se puede generar una degradación inicial o parcial, caracterizada por el cambio en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, apenas perceptibles, y si no se interviene para evaluar y restituir las condiciones iniciales, se puede generar una degradación extrema o final, si en esta etapa tampoco se interviene, entonces se producirá la desertificación.

2.3 Acidificación de los suelos

La acidez es una característica que se encuentra bastante acentuada en suelos tropicales húmedos como los de la zona de los Yungas de la Paz, donde el hidrogeno y aluminio se encuentran en proporciones considerables respecto a las bases cambiables en los horizontes superiores.

Los suelos tropicales no pueden ser uniformes debido a la gran variedad de clima, vegetación, material originario, geomorfología y edad (Sánchez, 1976). En general los suelos de los Yungas presentan textura franco arcilloso, una estructura de tipo bloque angular medio y fino, pH que varía generalmente desde 4.5 hasta 5.5.

En algunas zonas desde el grado de acidez es más elevado (4.0 a 4.5), presentan acumulación de formas tóxicas de Al^{+3} intercambiable además de carencias, principalmente de calcio y magnesio. Un ácido es una sustancia que tiende a entregar protones (iones hidrógeno).

Por otro lado Espinosa (1987), menciona que una base es cualquier sustancia que acepta protones. La acidez de una solución está determinada entonces por la actividad de los iones hidrógeno (H^+) haciendo uso de estos principios químicos, la acidez en el suelo se determina midiendo la actividad del H^+ en la solución del suelo y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH).

2.3.1 Origen de la acidez de los suelos

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:

a) 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+} .

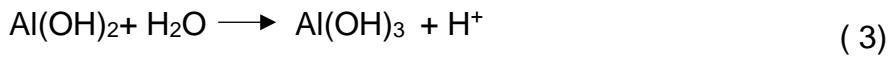
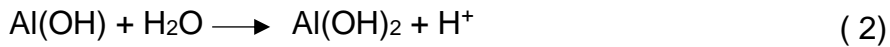
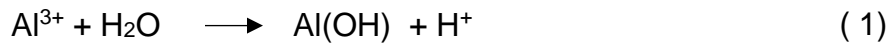
b) Laboreo de suelos, es propio de una agricultura de carácter intensivo, favoreciendo considerablemente la pérdida de los elementos básicos, al dejar temporalmente el suelo sin una cubierta vegetal protector.

c) 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.

d) Materia orgánica, a pesar de ser menos peligroso, el humus contiene grupos activos que se comportan como ácidos débiles y liberan iones de hidrógeno.

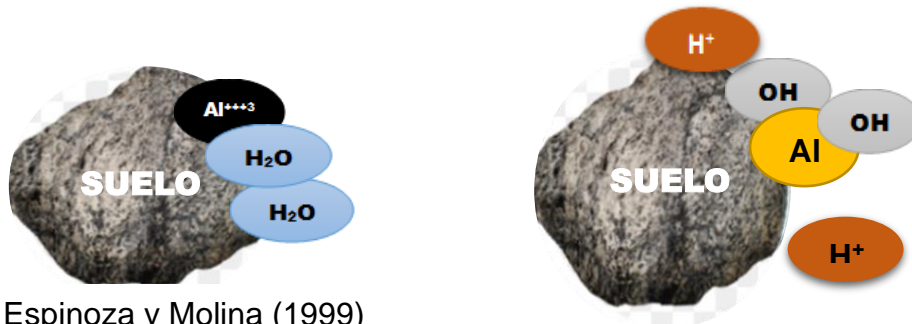
2.3.2 Aluminio intercambiable

Es reconocido ampliamente el papel del aluminio (Al^{3+}) intercambiable 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: La acidificación del suelo en presencia de aluminio, se representa mediante las siguientes reacciones, correspondientes a la hidrólisis del aluminio:



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 tal como se observa en la figura 1.

Figura N° 1. Acidificación del suelo a través de la reacción del Al^{3+} con el agua



Fuente: Espinoza y Molina (1999)

2.3.3 Absorción del aluminio por la planta

El aluminio puede ser tomado por la planta con gran rapidez principalmente cuando el suelo tiene una reacción ácida.

Narváez (2010), menciona que el aluminio obstaculiza la translocación de nutrientes a la parte aérea, los cuales se manifiestan como deficiencias nutricionales principalmente de P, Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los altos niveles de saturación de aluminio en el suelo reducen el crecimiento de las raíces, inhibiendo su elongación y penetración en el suelo y consecuentemente, reduciendo la absorción de agua y nutrientes.

Liao *et al.*, (2006), citado por Cristancho *et al.*, (2010), señalan que el aluminio presenta efectos adversos sobre el crecimiento y desarrollo de las raíces, en las cuales, el primer sitio de afectación son los ápices, siendo la cofia y las zonas meristemática y de elongación las que acumulan más aluminio y registran la mayor sensibilidad al daño físico en comparación con los tejidos maduros.

Bajo estrés por aluminio, el sistema radical presenta un color pardusco, con raíces gruesas, quebradizas, cortas y muy ramificadas. En estas condiciones, las plantas exploran un volumen muy reducido de suelo y se vuelven ineficientes en la toma y transporte de agua y elementos esenciales (Feixa, 2001).

2.3.4 Toxicidad por efecto del aluminio en las plantas

El término toxicidad en el caso del aluminio se refiere a varios aspectos que afectan el normal desarrollo de las plantas sensibles a la acidez. La presencia de altas concentraciones de Al^{3+} en la solución del suelo inhiben también la absorción de Ca y Mg por las plantas (Iñiguez, 2001).

La concentración de Al^{3+} es más alta en las raíces que en los tejidos aéreos. El primer síntoma perceptible 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 y Aguilar, 2007).

El efecto del aluminio en la planta se manifiesta en la alteración de la permeabilidad de las células de la raíz, inhibición de la división celular en la región meristemática de la raíz reduciendo el crecimiento de las raíces, causando la muerte del ápice y el desarrollo de raíces laterales (Donahue *et al.*, 1982; Pearson citado por Soto, 1995).

El exceso de Al^{3+} en el suelo puede conducir a otros problemas nutricionales como: color pálido o descolorido, crecimiento marchito o raquítico, tallos finos o débiles y manchas necróticas (Management, 2014).

2.3.5 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 (Encina, 2016).

Entre las técnicas para corregir la toxicidad del aluminio se puede aplicar mulch y abonos verdes, materiales que describen gran efectividad en la reducción de los efectos tóxicos del Al^{3+} en suelos ácidos.

El encalado del suelo permite incrementar el pH y convertir el exceso de H^+ en H_2O , e inducir a la precipitación del Al^{3+} como $\text{Al}(\text{OH})_3$ que es un compuesto insoluble. La presencia de Al^{3+} en la solución del suelo reduce considerablemente el desarrollo de las micorrizas las que, mediante el incremento en la toma del fósforo, entre otros, ayudarían a reducir los efectos tóxicos del Al^{3+} para los vegetales. Finalmente, la selección y multiplicación de plantas tolerantes al Al^{3+} , en la actualidad es posible obtener plantas transgénicas con una tolerancia elevada a Al^{3+} , en especies de importancia económica como: tabaco (*Nicotiana tabaco*) y papaya (*Carica papaya*).

2.3.6 Efectos del manganeso

Iones como Mn^{2+} se encuentran en la solución del suelo. Este elemento, aunque estén en bajas concentraciones, es tóxicos para la mayoría de los cultivos. Los daños causados por un exceso de Mn siguen en importancia a los efectos perjudiciales de la toxicidad del Al en las plantas. La solubilidad de este elemento y su eventual toxicidad dependen de varias propiedades del suelo, tales como: contenido de Mn total, pH, nivel de materia orgánica, actividad microbiana y grado de aireación. La toxicidad se presenta en suelos con altos contenidos de Mn, también en aquellos con niveles de pH inferiores a 5.5, y en el caso de las plantas sensibles a este problema (Fassbender, 1987; Henin y Grass, 1972).

Las plantas muestran síntomas bastante característicos para las especies individuales, síntomas que suelen aparecer aún antes de que haya una reducción apreciable en el

crecimiento y la producción; un exceso de Mn hizo mermar apreciablemente la nodulación de leguminosas tropicales (Fassbender, 1987).

2.4 El encalado en los suelos

La corrección del nivel de aluminio en la solución del suelo puede lograrse mediante el encalado. Es importante realizar un diagnóstico claro y preciso del problema de acidificación, para ello es fundamental realizar, como primera medida, el análisis de suelo, esta acción permitirá no solamente aplicar la cantidad adecuada de cal, sino también ahorrar en recursos económicos al productor. La calidad del material debe ser tomada muy en cuenta, mientras más fino sea el material encalante, el tiempo de reacción será menor, se recomienda una nueva aplicación luego de cuatro a cinco años, después de la última aplicación, también es necesario considerar el nivel de sensibilidad al aluminio que presenta el cultivo a desarrollar y las necesidades nutricionales del mismo (Encina, 2016).

El propósito del encalado es neutralizar la presencia del hidrógeno en la solución del suelo o del aluminio y/o manganeso que se encuentran en forma intercambiable o en la solución del suelo. El encalado con diferentes enmiendas provoca la precipitación del aluminio, situación que favorece el crecimiento de las raíces (Orsag, 2010).

Es una práctica muy común usada para mejorar la productividad en los suelos ácidos, reduciéndose el problema de la acidez, neutralizando los iones hidrógenos liberados por la materia orgánica y el aluminio intercambiable. Conforme aumenta el pH, proporciona elementos como el Ca y Mg, si ella es cálcica o dolomítica (Coleman *et al.*, 1967).

2.4.1 Efecto del beneficio del encalado

Zapata (2004), afirma que cuando el encalado se suministra al suelo en dosis adecuadas, puede brindar los siguientes beneficios:

- ✓ Inactiva el Al intercambiable en solución; Reduce el efecto tóxico del Al^{3+} , Fe^{3+} y el Mn^{2+} .
- ✓ Mejora la disponibilidad del P, estimula la nitrificación y promueve la fijación del N.
- ✓ Mejora la disponibilidad de algunos nutrientes.

- ✓ Incrementa la capacidad de intercambio catiónico.
- ✓ Reduce la fijación de P.
- ✓ Aumento en el valor del pH del suelo.
- ✓ Mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.
- ✓ Mejoramiento el sistema radicular.
- ✓ Aumenta el contenido de Ca y Mg.
- ✓ Mejora la actividad microbiana.
- ✓ Mejora la eficacia en el aprovechamiento de fertilizantes.
- ✓ Aumenta el proceso de nitrificación y mineralización de la materia orgánica
- ✓ Favorece el movimiento del agua y aire del suelo.

2.4.2 Materiales encalantes

De acuerdo a Vázquez *et al*; (2012), existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más comunes se pueden citar los siguientes:

- Calcita

También conocida como roca caliza, es un producto natural a base de carbonato de calcio es el que más se utiliza para corregir la acidez de los suelos y se obtiene por la molienda de rocas calcáreas cuyo principal constituyente químico es el CaCO_3 La calcita pura contiene un 40 % de Ca (Quiroga,2014).

- Dolomita

El carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaCO}_3 \bullet \text{MgCO}_3$) se denomina dolomita. El material puro contiene 21.6% de Ca y 13.1% de Mg. Aunque la dolomita reacciona más lentamente en el suelo que la calcita, tiene la ventaja de que suministra Mg, elemento con frecuencia deficiente en suelos ácidos (Jaramillo, 2002).

- **Óxido de calcio**

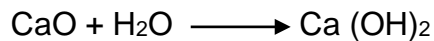
El óxido de calcio (CaO) se conoce como cal viva o cal quemada. Es un polvo blanco difícil de manejar por su efecto cáustico. En estado puro contiene un 71% de Ca. Se fabrica calcinando caliza en hornos intermitentes o continuos, proceso que produce la siguiente reacción:



La ventaja del uso es la mayor velocidad de la reacción de las partículas del material lo que permite una rápida en la corrección de la acidez (Bernier y Alfaro 2006; Jaramillo, 2002).

- **Hidróxido de Calcio**

Se conoce como cal apagada o cal hidratada Ca(OH)_2 . Se obtiene a partir de la reacción del CaO con agua, lo que produce la siguiente reacción:



Es un producto de color blanco difícil de manejar, reacciona rápidamente con el agua del suelo, recomendándose su rápida incorporación. En forma pura contiene un 56 % de Ca. Tanto el óxido como el hidróxido de calcio son recomendables para su aplicación en cobertera por su acción rápida. Su difícil manejo y elevado costo limitan su utilización (Bernier y Alfaro, 2006).

- **Óxido de Magnesio**

Es un material que contiene solamente Mg en una concentración de 60 %. Su capacidad de neutralizar la acidez, es mucho más elevada que las de otros materiales, pero por su poca solubilidad en agua debe molerse finamente para que controle adecuadamente la acidez del suelo. Es una fuente de Mg para suelos ácidos que frecuentemente son deficientes en este elemento (Jaramillo, 2002).

- **Magnesita**

Es un producto a base de carbonato de magnesio (MgCO_3), que en su forma pura posee un contenido de Mg de 28.5%. Es una excelente fuente de Mg.

2.4.3 Calidad del material encalante

Según Espinoza y 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 m^3 de cal sólida solo tiene 6 m^2 de superficie. Esa misma cantidad molida y cernida en un tamiz de malla 100, tiene 60.000 m^2 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.

2.4.4 Duración del efecto de la cal

El efecto de la cal es muy variable y depende de la dosis de aplicación, del tipo de suelo textura (suelos arenosos retienen menos a diferencia de suelos más arcillosos), capacidad Tampón, entre mayor sea más difícil de modificar el pH del suelo), el clima (a mayor precipitación, menos duración del efecto), topografía (suelos con mayor pendiente son susceptibles a mayor lavado) depende del tipo de cultivo y requerimientos del cultivo.

La mejor forma de determinar cuándo es necesario encalar nuevamente es monitorizando el pH del suelo y particularmente el contenido de Al^{+3} (Espinoza y Molina, 1999)

Generalmente se espera que los efectos benéficos del encalamiento de suelos ácidos duren varios años, Sin embargo, los efectos residuales por lo general duran menos en las regiones tropicales que en las templadas debido a la mayor precipitación y a las temperaturas más altas (Ortega, 2014).

2.4.5 Dosis de cal

El requerimiento de cal depende tanto de las propiedades físicas, químicas del suelo como los requerimientos del cultivo. Dosis muy bajas no reducen la acidez del suelo de forma cuantificable y su efecto residual es casi nulo. Por esta razón, la cantidad de cal a aplicarse depende del tipo de suelo, el pH, el contenido de Al^{+3} , la concentración crítica de nutrientes como Ca y Mg y el tipo de cultivo (Osorno, 2012).

Por otro lado, Alvarado y Fallas (2004), indican que para determinar las necesidades de cal se deben antes conocer cuatro factores: tolerancia de la planta a la acidez, contenido de acidez del suelo, calidad del producto encalante a utilizar y los aspectos del manejo del producto involucrados en la aplicación (voleo, banda o incorporado).

El pH es un buen indicador de la acidez del suelo, sin embargo, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para controlar la acidez presente en el suelo.

2.4.6 Forma de aplicación de la cal

Osorno (2012), indica que otro factor importante que determina la efectividad de la cal es la forma de aplicación. Es esencial incorporar la cal de modo que se logre un contacto máximo del material de encalado con el suelo en la capa arable. La mayoría de los materiales de encalado son solo parcialmente solubles en agua, por lo tanto, la completa incorporación en el suelo es muy importante para que la cal reaccione completamente. Además, es indispensable que el suelo se encuentre húmedo para que las reacciones de cal ocurran.

Es necesario tener cuidado con la aplicación de cal en cultivos perennes establecidos. Un error común con respecto a la cantidad de cal a aplicarse se comete al dividir la recomendación total por hectárea entre el número de plantas en esa superficie. Al hacer esto se corre el riesgo de aplicar cantidades excesivas de cal en la zona o banda de fertilización, que es el área que debe recibir la enmienda. Una mejor manera de determinar la cantidad de cal a aplicar por planta es dividiendo la recomendación total por hectárea entre el área de la banda o zona donde se hará la aplicación de la cal. Esto permite aplicar la cal suficiente para controlar la acidez en el área afectada evitando aplicaciones excesivas. En cultivos perennes es mejor eliminar los problemas de acidez aplicado e incorporando antes de iniciar una nueva plantación, la cantidad de cal necesaria.

2.4.7 Época y momento de aplicación

El efecto correctivo de los materiales de encalado requiere de algún tiempo para manifestarse en forma significativa en el campo, puesto que son materiales de baja solubilidad. Por ello, estos materiales deben incorporarse completamente en la capa arable (20 cm de profundidad) donde se encuentra la mayor proporción de las raíces de los cultivos (Campillo y Sadsawka, 1999).

Las reacciones de neutralización no se producen si no existe un medio favorable. En condiciones apropiadas, las reacciones ocurren relativamente rápido, por esta razón, la época más apropiada para aplicar la cal es un poco antes o al inicio de las lluvias, lo que asegura que existirá suficiente humedad en el suelo a lo largo del proceso de reacción de la enmienda (Chávez, 1993).

Salamanca (1984), indica por otro lado que los cultivos perennes ya establecidos y en producción se deben encalar después de la cosecha principal, por lo menos cada dos años, ya que el cultivo ha absorbido una buena proporción de los nutrientes que el suelo y los que aportan los fertilizantes. Con esto se logra el mantenimiento del contenido y el equilibrio de las bases, evitando la degradación del suelo por extracción de nutrientes, por efecto de la acidez causada por los fertilizantes, especialmente los nitrogenados, por

el lavado de Ca y Mg por altas precipitaciones y por los procesos erosivos provocados por las malas prácticas culturales.

2.4.8 Sobreencalado

Espinosa y Molina (1999), mencionan que finalmente la aplicación de dosis excesivas de enmienda constituye una práctica peligrosa que puede ser nociva para la producción de los cultivos, además de encarecer innecesariamente los costos de producción del cultivo. No debe olvidarse que el objetivo básico del encalado es eliminar solo aquella acidez toxica provocada por el aluminio activo y no pretender neutralizar toda la acidez natural.

El sobre-encalado es la aplicación excesiva de cal que eleva el nivel de pH cercanos al neutro (pH=7), generando fuerzas de repulsión en la superficie de los coloides, favoreciendo su dispersión y afectando a la agregación, provocando un deterioro de la estructura del suelo. Éste material suelto puede llegar a taponar los poros, reduciendo la infiltración y favoreciendo la escorrentía en el suelo. El sobre-encalado, también provoca deficiencias nutricionales para las plantas, especialmente de algunos oligoelementos como el Zn, B y Mn.

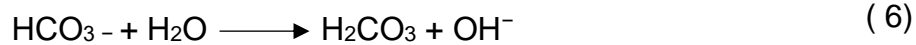
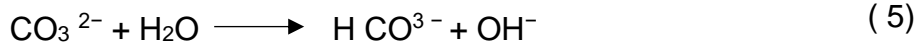
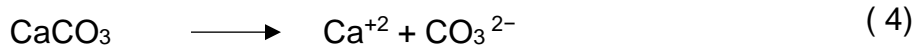
Cuando se hacen aplicaciones altas de cal (arriba de 2 t/ha) es necesario considerar cómo quedarán las proporciones entre calcio, magnesio y potasio después del encalado, ya que un sobre encalado puede provocar deficiencia de magnesio y potasio en las plantas (Toledo, 2016).

2.4.9 Neutralización de la acidez del suelo

La neutralización del aluminio intercambiable presente en la solución suelo, se consigue con la adición de cal, práctica conocida como el encalado que provoca la precipitación del aluminio, al formar $\text{Al}(\text{OH})_3$ (gibbsite) que precipita, eliminando el Al^{3+} intercambiable de la solución suelo, situación inicial que favorece al crecimiento de las raíces de las plantas (Orsag, 2010).

Los mecanismos de reacción de los materiales encalantes en el suelo permiten la neutralización de los iones H^+ en la solución por medio de los iones OH^- producidos al entrar la cal en contacto con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva

solamente cuando existe humedad en el suelo. Estas reacciones se presentan a continuación (Espinosa y Molina, 2001):



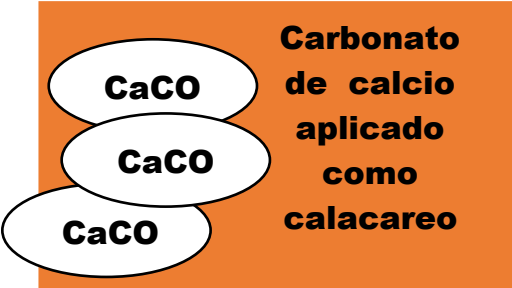
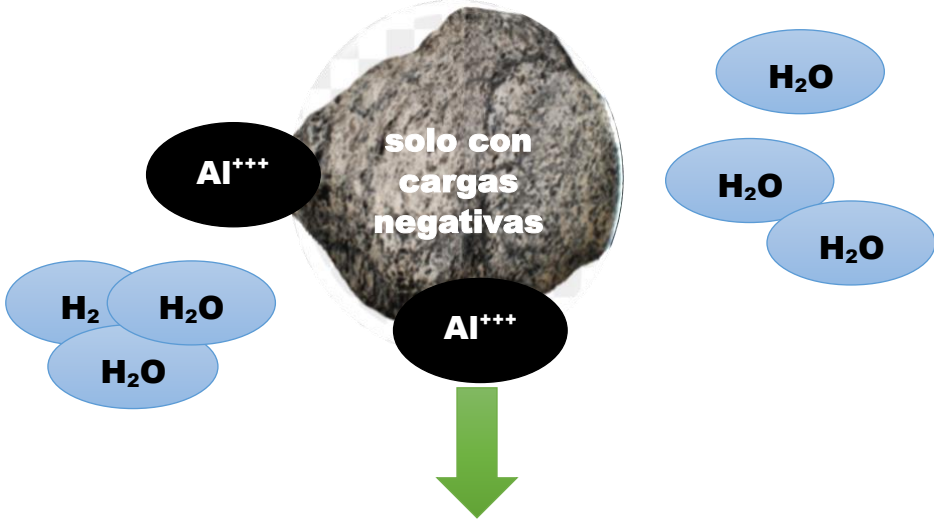
La tasa de las reacciones arriba indicadas y por lo tanto a disociación del CO_3^{2-} está directamente relacionada con la tasa a la cual los iones son removidos de la solución del suelo a través de la neutralización del H^+ y la formación de H_2O , mientras exista H^+ en la solución del suelo el CO_3^{2-} , HCO_3^- y H_2CO_3 continuarán apareciendo en la solución. En esta forma, el pH aumenta debido a que disminuye la concentración de H^+ en el suelo (Espinosa y Molina, 1999).

El efecto final de las reacciones de la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Sin embargo, es muy importante observar que el efecto del encalado va más allá de estas reacciones.

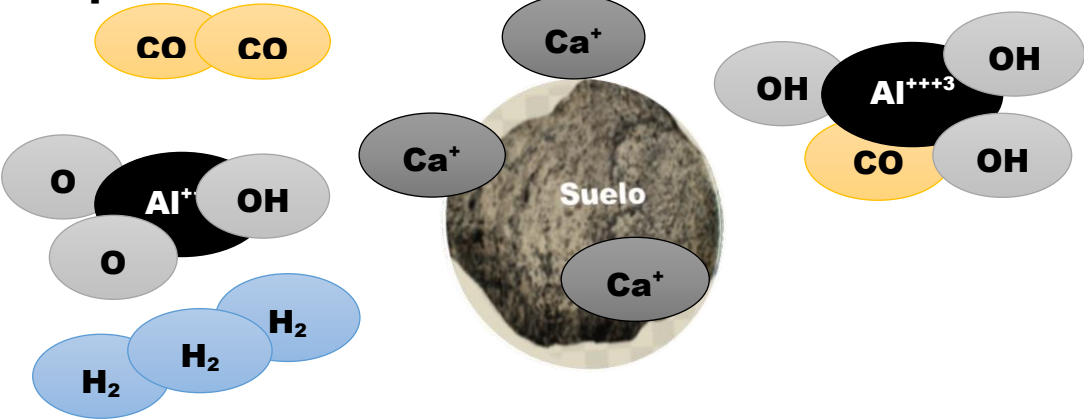
En la figura 2 se puede observar que el incremento de pH permite la precipitación del aluminio como $\text{Al}(\text{OH})_3$, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ . De igual manera, las aplicaciones de cal también precipitan el manganeso (Mn) y el hierro (Fe) que en ocasiones se encuentran en exceso en suelos ácidos (Batista, Moscheta, *et al.*, 2012).

Figura N° 2. Reducción de la acidez del suelo con la aplicación de la enmienda calcárea

Antes del encalado



Despues del encalado



Fuente: Espinoza y Molina (1999)

2.5 Importancia del análisis de suelo

Es de vital importancia porque nos brinda información referente a las características físico y químicos del suelo, que deben ser conocidas por el productor, ya que el conocimiento y desarrollo de los pastos cultivados y a cantidad y calidad de la producción del forraje están en relación directa con los nutrimentos y las características de los suelos (Mayhua y col, 2008).

Los análisis de suelos proporcionan una base para las recomendaciones de fertilización y enmiendas que deben aplicarse a un suelo como el yeso, en suelos alcalinos o materiales encalantes en suelos ácidos. Esta información debe interpretarse, primero en términos agronómicos y biológicos con respecto al crecimiento de las plantas luego se interpretará la información desde un punto de vista económico a fin de determinar el nivel de retorno deseado (Alaluna, 2000).

Los análisis se utilizan habitualmente para evaluar las deficiencias de nutrientes, constituyendo solo una parte de un método de diagnóstico que incluye etapas como el muestreo y la calibración e interpretación de los resultados que, junto con la información de naturaleza agronómica, permitirán efectuar una recomendación de fertilización. Pero otra aplicación de los análisis de suelos es para el monitoreo de la calidad del suelo, de tal forma que ayuden a decidir donde no hay que realizar aplicaciones de fertilizantes y también permiten evaluar la presencia de elementos tóxicos (Arias, 2004).

2.6 Características físicas del suelo

2.6.1 Textura

Orsag (2010), menciona que la textura es el contenido porcentual de arena, limo y arcilla que un suelo presenta. Como esas fracciones tienen diferentes cualidades para transmitir o retener el agua, aire, nutrientes y otros, consiguientemente las combinaciones de estas fracciones en diferentes proporciones le propician al suelo una fertilidad variada.

Dependiendo de la mayor proporción de estas partículas los suelos pueden ser arenosos, limosos, arcillosos. Los suelos francos, con una proporción similar de arena, arcilla y limo, son los más apropiados para el cultivo del café.

La textura es muy importante ya que de ella depende el comportamiento del aire y del agua en el suelo y por lo tanto, condiciona los fenómenos de aireación, permeabilidad y de asfixia radicular. Por otra parte, la textura del suelo nos puede ayudar a determinar que las propiedades físicas son más difíciles de corregir que las propiedades químicas, de ahí su interés desde el punto de vista de la fertilidad de un suelo (Bazán *et al.*, 2000).

2.6.2 Estructura del suelo

Es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). Desde el punto de vista agrícola, la estructura granular es la más adecuada. La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. La circulación del agua en el suelo varía notablemente de acuerdo con la estructura.

2.6.3 Densidad aparente

Según Miranda y Caballero (2015), la densidad aparente es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total del mismo, incluyendo el espacio poroso. La Densidad aparente varía con la textura, estructura, compactación, materia orgánica, actividad biológica y composición mineralógica del suelo.

Existe una relación clara entre el valor de la densidad aparente con otras propiedades y características del suelo; entre estas se destacan la textura, contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación, compresión, la conductividad térmica y la resistencia del suelo a la penetración. Valores altos de densidad aparente denotan compactación, mientras que valores bajos denotan mayor contenido de materia orgánica, ya que los suelos pesan menos.

2.7 Características químicas del suelo

2.7.1 pH

Dentro las características químicas de un suelo el pH determina es el del grado de acidez y alcalinidad de los suelos. Este parámetro es útil para definir el tipo de cultivo que sea

adaptable a las condiciones donde se requiera establecerlo, además define la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Miranda y Caballero, 2015).

El valor del pH expresa la concentración de los iones libres de hidrogeno en la solución de suelo. Este factor es determinante para el desarrollo del cafetal debido a su influencia en la solubilidad y absorción de los nutrientes en la solución de suelo (Castañeda, 2000).

De acuerdo a la tabla 2, el pH óptimo del suelo varía de 5.5 a 6.5. Cuando es menor de 5.5, se debe evaluar los contenidos de manganeso (Mn) y de aluminio (Al), entre otros nutrientes. Si el nivel de estos elementos es alto provoca toxicidad en la planta como se Además, afecta la población y las actividades de los microorganismos en la mineralización de la materia orgánica (Cenicafe, 2016).

Tabla 2. Niveles de pH para clasificar el estado nutricional del suelo

Descripción	Rango
Extremadamente ácido	Menor de 4.5
Fuertemente ácido	4.6 - 5.4
Moderadamente ácido	5.5 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	Mayor de 8.5

Fuente: Vislao (2021).

2.7.2 Materia orgánica

Miranda y Caballero (2015), indican que la materia orgánica que contiene el suelo procede tanto de la descomposición de los seres vivos que mueren sobre ella, como de la actividad biológica de los organismos vivos que contiene: lombrices, insectos, microorganismos, etc. La descomposición de estos restos y residuos metabólicos da origen a lo que se denomina humus.

Por otra parte Rodríguez (1982) citado por Rojas (2016), señala que la materia orgánica proviene de la síntesis de los organismos vivos que combinan los distintos elementos en su funcionamiento metabólico y catabólico.

También reduce los efectos de compactación, contribuye a mejorar la estructura del suelo y aumenta la tasa de infiltración de agua y la tolerancia a los efectos nocivos de los herbicidas y otros biocidas, además es fuente de energía y nutrientes para los microorganismos del suelo (Gomero, 1999). La tabla 3 nos muestra los niveles de materia orgánica para clasificar el estado nutricional de un suelo para café.

Tabla 3. Niveles de materia orgánica para clasificar el estado nutricional

Nivel	Contenido MO (%)
Bajo o pobre	Menos de 2
Medio	2 – 4
Alto rico	Mayor a 4

Fuente: Vislao (2021).

2.7.3 Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.)

La FAO (2015), manifiesta que la CIC es la medida de todas las cargas existentes en la parte superficial de los minerales, estas de tipo negativa y en los componentes orgánicos del suelo como arcilla, sustancias húmicas y materia orgánica. Su valor, nos revela la aptitud de un suelo en cuanto a la retención de cationes, cuán disponible, y en qué cantidad, están los nutrientes a las plantas, pH entre otras.

Los cationes cambiables influyen en la estructura, la actividad biológica, el régimen hídrico y gaseoso, la reacción, los procesos genéticos del suelo y en su formación. Como cationes cambiables del suelo se presentan principalmente Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , Al^{+3} , Fe^{+3} , Mn^{+2} , o H^{+} . La suma total de cationes intercambiables que puede adsorber un suelo. Se expresa en mili equivalente por 100g suelo u otro material de intercambio como la arcilla (Rodríguez, 1992).

Muchos suelos tropicales corrientemente tienen valores de CIC efectiva menores de 4. En esos suelos el incremento de la CIC es un objetivo importante de manejo. Ello puede

lograrse mediante dos procesos: Encalando suelos ácidos con sistemas de óxidos o de silicatos laminares con revestimiento de óxido, y aumentando el contenido de materia orgánica del suelo (Sánchez, 1976).

Según Arvildo (2009), los cationes de mayor importancia con relación al crecimiento de las plantas son el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K) amonio (NH), sodio (Na^+) e hidrógeno (H^+). Los primeros cuatro son nutrientes y se encuentran involucrados directamente con el crecimiento de las plantas. El sodio y el hidrógeno tienen un pronunciado efecto en la disponibilidad de los nutrientes y la humedad. En los suelos ácidos, una gran parte de los cationes son hidrógeno y aluminio en diversas formas.

Tabla 4. Niveles de CIC para clasificar el estado nutricional del suelo

Nivel	CIC (meq /100 suelo)
Bajo	Menor de 4
Medio	4 – 30

Fuente: Vislao (2021).

2.7.4 Acidez del suelo

La acidez en los suelos afecta las características químicas y biológicas, que reducen el crecimiento de las plantas, tales como la disminución en la disponibilidad de nutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y P, y la proliferación de elementos como el Al^{3+} y Mn que en cantidades altas pueden ser tóxicos para las plantas (Molina y Rojas, 2005).

La acidificación de los suelos los lleva a una disminución de la saturación de bases causada por la pérdida de cationes en el agua de drenaje. El resultado final es un suelo saturado con cationes ácidos; H^+ y Al^{3+} , y eventualmente, se puede llegar a la presencia de iones de aluminio en el agua de drenaje (Zapata, 2004).

El aluminio puede ser absorbido por las plantas y junto al hidrógeno pueden alcanzar niveles tóxicos para las plantas (Thompson y Troeh, 1994).

2.7.5 Calcio del suelo

En muchos suelos la principal fuente de calcio para las plantas es el calcio intercambiable y el calcio de minerales fácilmente meteorizables (como carbonatos). Del mismo modo pasa con el magnesio, el Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables son removidos por las plantas y es factible de lavarse. Algunos suelos también proveen al contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiable a partir del Ca^{2+} y Mg^{2+} que se encuentra en las interlamina de ciertas arcillas de tipo 2:1 (Ca^{2+} y Mg^{2+} lentamente disponible). (Arvildo, 2009).

En suelos ácidos, el Ca no está fácilmente disponible para las plantas, por la baja saturación. Conforme disminuye la saturación de Ca^{2+} en el complejo de cambio, en proporción a la CIC total, la cantidad de Ca^{2+} absorbido disminuirá. La alta saturación de Ca^{2+} indica un pH favorable para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana. También, una predominancia de Ca usualmente significa bajas concentraciones de cationes cambiables como Al^{3+} en suelos ácidos y Na^+ en suelos sódicos (Azabache, 2003).

El calcio puede ser suministrado por medio de diferentes fuentes, la calcita y la dolomita son excelentes fuentes de calcio. Las plantas deficientes en calcio son raquílicas porque producen menor número de células y éstas son más pequeñas, sus tallos son débiles debido a que el espesor de sus paredes celulares es inferior.

Una parte del peligro de toxicidad de aluminio se relaciona con la deficiencia de calcio. La cantidad de calcio necesaria para promover un buen crecimiento radical depende de la concentración de aluminio en la solución (Thompson y Troeh, 1994).

2.7.6 Magnesio del suelo

La función más importante del magnesio está en relación con la fotosíntesis, es un constituyente esencial de las clorofilas (Gil, 1995).

La molécula de clorofila contiene un ión magnesio en el núcleo de su compleja estructura. En consecuencia, el magnesio es vital para la producción de clorofila, y realización de la función fotosintética (Thompson y Troeh, 1994).

La meteorización severa, la erosión y la eluviación de la arcilla tienden a reducir el contenido en magnesio de los horizontes superficiales del suelo (Thompson y Troeh, 1994). La fuente más común de magnesio es la dolomita, un excelente material que provee calcio y magnesio, al mismo tiempo que neutraliza la acidez del suelo (Inpofos, 1997).

2.7.7 Nitrógeno del suelo

Según Navarro (2003), el nitrógeno se encuentra en distintas formas en el suelo, aunque es absorbido por las plantas y microorganismos como nitrato (NO_3) o amonio (NH_4^+), puede encontrarse en muy diversos estados de oxidación y reducción. Entre las ganancias de nitrógeno en el suelo se pueden considerar las fijaciones (eléctricas, biológicas e industriales), los abonos de origen orgánico (estiércoles) y los residuos de cosecha, las pérdidas de nitrógeno más significativas son: la extracción por los cultivos, lixiviación, volatilización, desnitrificación y fijación de amonio .

Un aspecto muy importante con respecto al comportamiento del nitrógeno en el suelo, es su relación con el pH, cuando del amonio pasa a nitrato (nitrificación), se liberan iones H^+ lo que genera acidez en el suelo, por esta razón, la mineralización de la materia orgánica y el suministro de fuentes de nitrógeno amoniacales, incrementa la acidez, si la planta no absorbe el amonio directamente (Zavaleta, 1992).

Tabla 5. Niveles de nitrógeno para clasificar el estado nutricional

Nivel	Nitrógeno (%)
Bajo	menos de 0.1
Medio	0.1 - 0.2

Fuente: Vislao (2021).

2.7.8 Fósforo del suelo

La disponibilidad de este elemento depende del tipo de suelo, según esté, una pequeña o gran parte del fósforo total puede estar "fijado" (no disponible) en los minerales del suelo. Esto significa que la planta no puede absorberlo. En la naturaleza, el fósforo forma parte de las rocas y los minerales del suelo. Las fuentes de fósforo como nutrimento para

las plantas son los fertilizantes minerales y los fertilizantes orgánicos. Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la solución del suelo en forma de HPO_4^{-2} (ión - fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante ya sea de origen orgánico o mineral debe de transformarse primero en esas formas químicas antes de ser utilizado por el cultivo (Gomero, 1999).

El fósforo luego del nitrógeno, es el macronutriente que en mayor medida limita el rendimiento de los cultivos. Interviene en numerosos procesos bioquímicos a nivel celular y se lo considera un nutriente esencial para las plantas. La única entrada de este elemento al sistema proviene del agregado de fertilizantes fosfatados, mientras que las salidas pueden por extracción en los granos cosechados, erosión, escurrimiento, lixiviación (de escasa importancia). (Navarro, 2003).

2.7.9 Potasio del suelo

El potasio es uno de los tres nutrientes minerales que necesitan las plantas en mayor cantidad. Las plantas absorben el potasio que se encuentra en la solución del suelo en forma del catión K^+ . La cantidad de K en la solución del suelo está en función de la liberación del potasio intercambiable, generalmente localizado alrededor de las partículas de arcilla. Los cultivos extraen grandes cantidades de potasio del suelo para su crecimiento y desarrollo y como es de esperarse, la falta de este elemento, influye negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo.

El abastecimiento de K en el suelo es limitado, aun los suelos que contienen arcillas ricas en este mineral no pueden suplirlo indefinidamente. Es un error creer que en suelos que por naturaleza son ricos en K, adicionar este elemento a los cultivos es innecesario. El potasio extraído por los cultivos debe de regresarse al suelo para no disminuir la fertilidad del mismo; cuando el agricultor saca de la parcela o campo la cosecha, se está llevando consigo el K fuera del sistema agrícola (Gomero, 1999).

Tabla 6. Niveles de potasio para clasificar el estado nutricional de un suelo

Nivel	Potasio (kg/ha)
Muy bajo	Menos de 300
Bajo	300 – 600
Normal	Más de 600

Fuente: Vislao (2021).

2.8 Requerimientos nutricionales del cultivo de café

Carbajal (1984), menciona que los minerales denominados de exportación están compuestos por las siguientes macronutrientes y micronutrientes existentes en el cultivo de café:

Macronutrientes:

Nitrógeno, es un nutriente indispensable para la producción de café ya que participa en el desarrollo vegetativo y les confiere el color verde a las plantas de café. Así mismo forman parte de las moléculas de proteínas; participa en la transferencia de información genética, en la fotosíntesis y experimenta gran movilidad en la planta. La fuente de nitrógeno como sulfato de amonio no es muy recomendable porque aumenta la acidez del suelo y se recomienda aplicarlo en forma de urea.

La dosis de nitrógeno requerida por el cultivo se determina con base en los resultados de análisis de suelo del predio donde se establecerá o está sembrado el cultivo de café.

En el primer año del cultivo de café, se sugiere aplicar una dosis de 60 kg N/ha, al segundo año deben adicionarse 125 kg N/ha, y a partir del tercer año, se aplica el N restante, es decir, 250 kg N/ha. Estas dosis deben ajustarse de acuerdo con el resultado de un análisis de suelo.

La deficiencia del nitrógeno provoca la defoliación de las hojas, además genera granos pequeños los cuales posteriormente se caen en efecto reducen la densidad y la calidad del grano.

Fosforo, su mayor consumo se presenta en el periodo de crecimiento, es decir durante sus tres primeros años de vida. Forma parte de las moléculas que conservan y transfieren

energía en la planta para procesos metabólicos, hace parte de la bicapa de fosfolípidos de las membranas celulares y su absorción a través de HPO_4^{-2} (ión - fosfato monoácido) y H_2PO_4^- (ión fosfato diácido). Es indispensable para la formación de compuestos orgánicos, principalmente hexosas fosfatadas que experimenta una gran movilidad en la planta.

En el caso del cultivo de café, las cantidades de P requeridas para su fertilización también dependen de la edad del cultivo. Por lo tanto, en el primer año, la dosis recomendada es de 20 kg P/ha, en el segundo año 60 kg P/ha, y a partir del tercer año en adelante, la dosis propuesta es de 80 kg P/ha. Asimismo, al igual que el N, la dosis de P debe ajustarse según la concentración de P disponible en el suelo, valor que es obtenido mediante un análisis químico de suelo.

Potasio, su uso primordial por parte de la planta se hace durante la producción. Influye en procesos metabólicos como fotosíntesis, respiración, síntesis de clorofila, nivel hídrico en las hojas apertura y cierre de estomas y como activador enzimático y participa del flujo y translocación de metabolitos en la planta. No forma parte constitutiva de compuestos orgánicos, sin embargo, está presente en todos los tejidos vegetales y presenta una gran movilidad. El efecto máximo del potasio a través de la fertilización es de cuatro meses.

En el mismo sentido que los demás macronutrientes, se recomienda una dosis de 60 kg K/ha en el primer año, 125 kg K/ha en el segundo año y 250 kg K/ha desde el tercer año en adelante. La dosis recomendada siempre se debe ajustar considerando la concentración de este nutriente en el suelo, la meta de rendimiento y la edad de la planta de café. Este nutriente puede aportarse al suelo como sulfato de potasio o nitrato de potasio.

El exceso de potasio genera cualidades negativas como bebida amarga y áspera las cuales reducen la calidad en taza.

Calcio, juega un papel importante en la formación de estructuras constituidas por lípidos y en la formación de membranas y pared celular. Influye en el mecanismo de la mitosis y actúa como activador de enzimas durante el crecimiento. No experimenta gran movilidad en la planta. Es el tercer nutriente por importancia en términos de necesidades totales de

nutrición, una cantidad de 75 a 100 kg/ha es necesaria para un desarrollo productivo y granos de calidad. Sin embargo el exceso de calcio genera cualidades negativas como bebida amarga y áspera las cuales reducen la calidad en taza.

Magnesio, participa en la fotosíntesis y en el metabolismo de carbohidratos (glicolisis), así como en la integración de ribosomas. Promueve la transferencia de grupos fosfatos y en la activación enzimática de procesos metabólicos. Forma parte de la molécula de la clorofila. La deficiencia de magnesio genera granos de color marrón y de pobre característica de tostado.

Al igual que los demás nutrientes, los requerimientos de magnesio del cultivo de café se determinan con base en la meta de rendimiento esperada, la edad del cultivo, y la concentración de este nutriente en el suelo. Las dosis de este macronutriente se ubican entre 14 y 20 kg/ha, sin embargo, debemos considerar siempre el análisis de suelo para determinar la dosis correcta.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

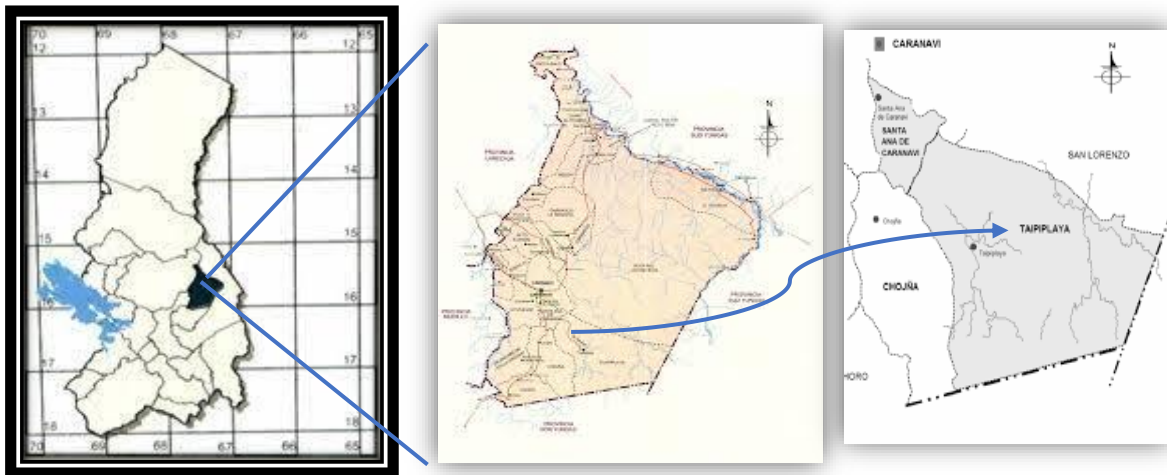
3.1 Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en la provincia Caranavi ubicado al norte del departamento de La Paz, comunidad Villa Victoria segundo tercer bando cantón Taipiplaya (Atlas Bolivia, 2010).

3.1.1 Ubicación geográfica

Geográficamente la comunidad Villa Victoria segundo tercer bando se encuentra a 1492 m.s.n.m.; entre los paralelos: 15°50' a 16°01' Latitud Sur y 67°23' a 67°34' Longitud Oeste.

Figura N° 3. Ubicación geográfica del área de investigación



Fuente PTDI Taipiplaya

3.1.2 Características ecológicas

3.1.2.1 Clima en el área de estudio

Según los datos la estación meteorológica de Caranavi situada a una altitud de 600 msnm entre los paralelos (67°34' N y 15°50' S). Las precipitaciones pluviales varían entre 1000mm y 2500mm al año y la humedad relativa fluctúa entre 60 a 80%. Las temperatura máxima promedio en la zona fluctúan entre de 21° a 30 °C. Las temperaturas mínimas extremas oscilan entre 16° C en el mes más frío a 23° C en el mes más cálido, con vientos variados predominando de norte a sud.

3.1.3 Topografía

La zona presenta un relieve topográfico accidentado - irregular, debido a las montañas y serranías de la Cordillera Oriental que la cruzan con pendientes que con depresiones que fluctúan entre 40 ° a 80° ,además se intercalan con planicies onduladas irregulares y pequeños valles. Por otro lado las pendientes pronunciadas incrementan los riesgos de erosión y deslizamientos (PDA Taipiplaya, 2007).

3.1.4 Suelos

El GAMC describe suelos poco profundos a profundos, de color pardo oscuro a pardo grisáceo, con texturas que van de franco a franco arcilloso. Con piedras grava y pedregones en todo el perfil causando baja capacidad de almacenamiento de agua. En

las capas superficiales el material grueso varía entre 15 y 80 %, mientras que en el subsuelo se encuentra entre 40 y 80%. Estos suelos en su superficie presentan una estructura migajosa a bloques subangulares mientras en los horizontes inferiores la estructura es principalmente en bloques subangulares o sin estructura (Mamani, 2003).

Los suelos son variados y cambian bruscamente de acuerdo a la topografía, las características químicas de los suelos del municipio de Caranavi presentan una variación química de reacción de extremadamente ácido a ligeramente alcalino (PH = 3,0 -7,9), con un promedio de 5.2 este valor se encuentran dentro de los niveles de PH recomendables para el cultivo de café, puesto que solo valores extremos de PH influyen en la disponibilidad de algunos nutrientes como Ca, Mg, K y P, actividad microbial y solubilidad de minerales del suelo.

En cuanto al contenido de calcio intercambiable en la capa superficial (0 – 20 cm) presenta un promedio de 6,43 meq/100gS en un rango que varía entre 0,3 hasta 23,0 meq/100gS con valores que varían desde bajos hasta altos, por otro lado el contenido de magnesio presenta un promedio de 2,23 meq/100gS en un rango que varía de 0,14 y 9,2 meq/100gS valores que muestran variabilidad desde muy bajos a altos.

Por otra parte el contenido de potasio intercambiable tiene un contenido promedio de 0,48 meq/100g S en un rango de 0,10 hasta 2,4 meq/100g S, estos valores muestran contenidos de potasio que varían de muy bajos a altos a una profundidad de 0 – 20 cm. La Materia Orgánica del suelo es muy variable con valores que fluctúan entre 1 a 7,6 %.

La capacidad de intercambio catiónico en la primera capa superficial (0 – 20 cm) presenta un contenido promedio de 12,5 meq/100gS, en un rango que varía de 1,7 a 30,3 meq/100gS. Estos valores están dentro de la categoría de contenido medio, por ello se interpreta que estos suelos tienen un nivel mediano de CICE y lo recomendable sería hacer correcciones del nivel de pH para mejorar el intercambio de cationes entre el suelo y la planta.

3.1.5 Vegetación

La vegetación natural predominante en la zona de estudio es: Caña hueca (*Phragmites communis*), Siquile (*Inga luschnatiana*), Toco blanco (*Serebo*) (*Schizilobium amazonicum*) y especies maderables que son de beneficio por los agricultores como el Cedro (*Cedera tubiflora*), Sangre de toro (*Virola sobifera*), Ajo Ajo (*Cordia glabrata*), Laurel (*Ocotea sp.*) (Lizarro, W.1997).

3.1.6 Características agrícolas

Los cultivos permanentes de mayor importancia en la zona de intervención son los siguientes: Mandarina (*Citrus deliciosa*), Lima (*Citrus limeta*), Naranja (*Citrus sinensis*), Papaya (*Carica papaya*), Mango (*Manguifera indica*), Banano (*Musa caminata*), Plátano (*Musa balbisinia*), Palta (*Persea americana*), Café (*Coffea arabica*), Mayz (*Zea mays*), Coca (*Erythroxylum coca*), entre los más sobresalientes de la zona (Lizarro, W.1997).

3.1.7 Características ecológicas

Holdridge (1982), citado por Vallejos (2004), menciona que según la memoria explicativa del Mapa Ecológico de Bolivia la zona de trabajo está ubicada a la región subtropical de tierras y valles, el cual se caracteriza por el predominio de áreas de climas muy húmedos hasta pluviales, combinados con suelos de fuerte relieve, sometidos a procesos de remoción en masa y en consecuencia muy erosionables.

3.2 Materiales

3.2.1.1 Material encalante

Para el presente trabajo de investigación se utilizó la cal dolomita. El cual fue mandado a analizar en el laboratorio de Química Industrial proveniente de la Facultad de Tecnología de la Universidad Mayor de San Andrés, el mismo que presentó las siguientes características tal como se observa en la tabla 7 y 8.

Tabla 7. Composición química de la cal dolomita

Muestra	Ca%	Mg%	CaCO ₃ %	MgCO ₃ %
Dolomita	33,65	2,80	76,64	8,14

Fuente: Laboratorio de Química de la U.M.S.A. (2021)

3.2.1.2 Característica de la cal dolomita

Tabla 8. Características de la cal dolomita

ITEM	Poder neutralizante	Humedad	Granulometría
Dolomita	Igual o mayor 95%	Menor a 1%	Malla 100

3.2.2 Material de estudio

- El material vegetal utilizado son arboles de café en etapa de desarrollo (*Coffea arabica*) ya establecidas hace un año en parcela. Para fines de investigación se ha considerado una variedad Catuaí rojo. Con distanciamiento entre plantas de 1.20m y 2m entre filas obteniendo un total de 4400 plantas/ha.

3.2.3 Materiales de Campo

Vernier cinta métrica, flexómetro, barreno muestreador de suelos, chuntilla, palas, estacas, machete, letreros, marbetes, bolsas siploc, baldes, tamizador, planilla de registro, libreta de campo, cámara fotográfica, yutes, pH-metro, balanza analítica, GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

3.2.4 Material de Gabinete

Equipo de computación, calculadora, papelería, mapa de uso actual de tierras, cuaderno de registro, base de datos de los técnicos del IPDSA, impresora.

3.3 Metodología

3.3.1 Diseño experimental

El ensayo fue conducido y analizado bajo el diseño de bloques completamente al azar (DBA) que corresponde al modelo lineal aditivo propuesto por (Ochoa, 2007 citado por Quisbert, 2018).

3.3.1.1 Modelo lineal aditivo

El análisis estadístico está basado en el siguiente modelo lineal aditivo.

$$X_{ijk} = \mu + \beta_j + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

X_{ijk} = Observación Cualquiera

μ = Media General

β_j = Efecto del j – ésimo Bloque

α_i = Efecto de la i – ésima (dosis de cal dolomita)

ϵ_{ij} = Error Experimental

3.3.2 Tratamientos en estudio

El factor de estudio fue el aporte de diferentes dosis de dolomita evaluados a los 180 días, los tratamientos analizados fueron tres, que a continuación se muestran en el cuadro 9.

Tabla 9. Descripción de los tratamientos

Tratamientos	Descripción		
	Enmienda	Dosis gr/planta	Dosis kg/ha
T ₀	Testigo	0	0
T1	Cal dolomita	100	440
T2	Cal dolomita	120	528

3.3.3 Dimensiones del área de estudio

Las dimensiones utilizadas en el ensayo se presentan en la tabla 10 y fueron las siguientes:

Tabla 10. Detalle del área (parcela) de estudio

Parámetro	Valor
Superficie total	2500m ²
Área por bloques:	30m ²
Distancia entre plantas	1,20m
Distancia entre columnas	2m
Número de tratamientos	3

Número de bloques	3
Numero de UE	9
Número de plantas / UE	122
Número total de plantas	1100

3.3.4 Croquis experimental

3.3.4.1 Croquis de la distribución de tratamientos

La figura 4 Presenta la distribución de las unidades experimentales del estudio.

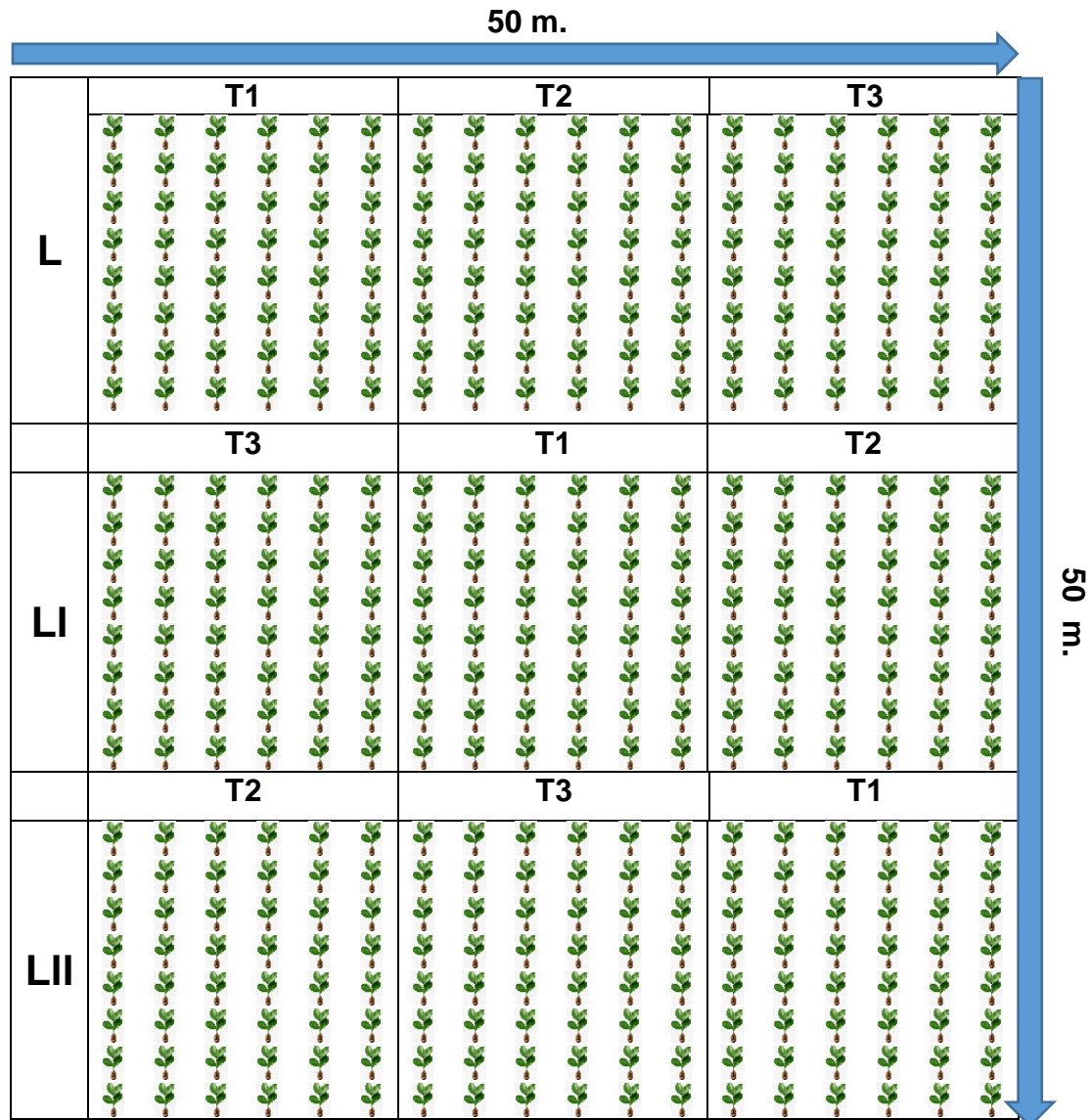
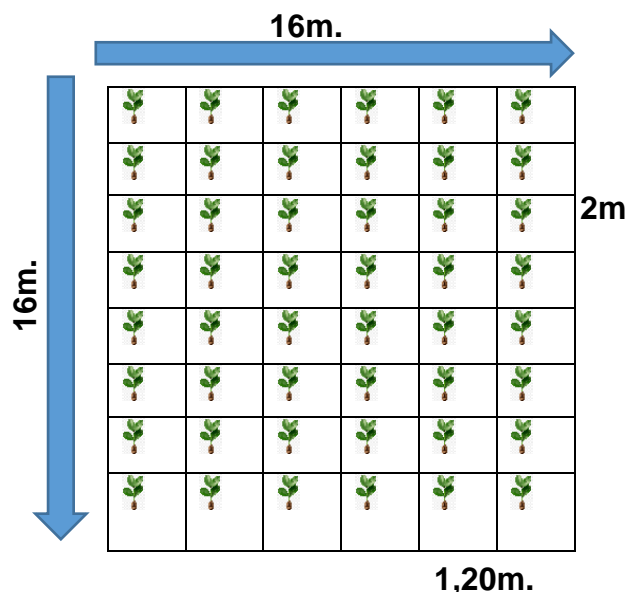


Figura N° 4. Croquis de la distribución de tratamientos de la aplicación de dolomita en el cultivo de café

Área por tratamiento



Para el seguimiento y la toma de datos se descartaron las plantas de café dispuestas en las columnas externas, como también las plantas de las filas situadas en la cabeza y pie de la parcela. Las 4 plantas de café consideradas para su evaluación y toma de datos fueron seleccionadas al azar.

3.3.5 Trabajo inicial de gabinete

3.3.5.1 Recopilación de información secundaria

En esta fase se realizó la búsqueda de información existente sobre el clima, suelos así mismo tesis, proyectos, PDM y estudios realizados en la zona de estudio; los mismos que luego de un análisis y evaluación apoyaron la planificación de este estudio.

También en esta etapa antes de iniciar el trabajo de campo, se sostuvieron reuniones con los técnicos del programa café IPDSA (Institución Pública Desconcentrada Soberanía Alimentaria) dependiente del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT), principalmente para la presentación del estudio a realizar y al mismo tiempo solicitar el permiso respectivo a las autoridades regionales, beneficiarios del programa café.

Mediante la base de datos del Programa Café y la colaboración de los técnicos se ubicó cafetales con problemas de acidez y se seleccionó las parcelas para la investigación.

3.3.6 Trabajo de campo

3.3.6.1 Primer muestreo del suelo en estudio

La toma de muestras de suelo se realizó en toda el área experimental de cuarta hectárea (2500 m²) conocida comúnmente como cato, utilizando el método de zigzag (Chilón, 1997).

Para tal efecto se utilizó una pala recta y se hizo cortes en forma de “V” a una profundidad de 20 cm aproximadamente, posteriormente se realizó el cuarteo conformando así una muestra compuesta y representativa del lugar de 1kg, introduciéndolo en bolsas plásticas con sus respectivos datos. Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de la Facultad de Agronomía Suelos y Agua (LAFASA) de la U.M.S.A. el cual permitió conocer las características fisicoquímicas del suelo.



Figura N° 5. Toma de muestra del suelo en estudio

3.3.6.2 Determinación de la dosis de encalado

La dosis de encalado fue determinada en base a las variables edafológicas del suelo en estudio reportadas por el laboratorio LAFASA, utilizando las recomendaciones de CENICAFE (Centro Nacional de investigaciones de café, 2007) tal como se muestra en el la tabla 12.

Tabla 11. Recomendaciones para el encalamiento de los cafetales en la siembra y 12 meses después con base en el pH y el contenido de calcio.

pH	Dosis de material encalante por hoyo o por plato del árbol (g)		
	Ca<1,5	1,5<Ca≤3,0 (Cmol/kg)	Ca>3,0
pH ≤ 4,0	120	100	80
4,0 <pH≤5,0	100	80	60
5,0<pH≤5,5	40	0	0

A continuación se describe las variables edafológicas del suelo en estudio, consideradas para determinar la dosis de cal dolomita

$$\text{pH} = 4,73$$

$$\text{Ca} = 0,85 \text{ meq}/100\text{gS}$$

3.3.6.2.1 Trazado del diseño experimental

El trazado del diseño experimental se realizó en un cato con plantas de café ya establecidos en parcela con ayuda de estacas y cordeles, para la identificación de los tratamientos, así mismo cada tratamiento y bloque fue identificado con sus respectivos letreros.

3.3.6.3 Control de malezas

El plateado y eliminación de malezas se realizó mensualmente esto para que no compitan con la planta de café e interfiera en el desarrollo normal del cultivo.

3.3.6.4 Incorporación de cal dolomita

Después de la distribución de los tratamientos, se procedió a la incorporación de cal dolomita en los niveles de 0, 100 y 120 gramos, respectivamente a las unidades experimentales. Se realizó debajo de la proyección de la copa de cada planta de café, porque es en ésta zona superficial se ubican la mayoría de las raíces, para luego realizar la mezcla con el suelo y cubrir con abundante hojarasca para facilitar su reacción en el suelo.



Figura N° 6. Incorporación de las dosis de cal dolomita en la parcela de café

3.3.6.5 Marbeteado de plantas

Se identificaron cuatro plantas para cada unidad experimental en forma aleatoria, tomando solo, de la parcela útil excluyendo plantas de los de los bordes. Las plantas seleccionadas fueron señaladas con marbetes para su evaluación.

3.3.6.6 Segundo muestreo de suelo en estudio

Estas muestras de suelo fueron colectadas después de los 180 días a una profundidad de 20 cm, por cada tratamiento y repetición se obtuvo una muestra constituida por un kilo de suelo; producto de 5 puntos de muestreo, exactamente debajo de la proyección de la copa de la planta en la zona donde se aplicó las enmiendas.

Para el muestreo se utilizó un barreno y bolsas, previamente codificadas; las muestras fueron enviadas de igual manera como aun inicio al laboratorio de la Universidad Mayor de San Andrés LAFASA de la Facultad de Agronomía pero solo se evaluó las propiedades químicas.

3.3.7 Variables de respuesta

3.3.7.1 Características de las propiedades físicas y químicas del área de investigación

Para evaluar las características físicas y química del suelo se llevó a cabo siguiendo los siguientes métodos analíticos tal como se observa en la tabla 12 y 13 :

Tabla 12. Descripción de las propiedades físicas

PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO
Propiedades físicas		
Arena	%	
Limo	%	Bouyucos
Arcilla	%	
Clase textural		
Densidad Aparente	g/cm ³	Probeta

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos LAFASA.

Los procedimientos para la determinación de las características químicas del suelo se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Descripción de las propiedades químicas

Propiedades químicas		
PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODOS
pH en H ₂ O relación 1:5		Potenciometria
Conductividad	mmhos/cm	Potenciometria
Eléctrica en agua 1:5		
Acidez Intercambiable (Al+H)		Volumetría
Calcio intercambiable		Acetato de amonio1N
Magnesio Intercambiable		(Espectrofotómetro de absorción atómica)
Sodio intercambiable	Meq/100g	Acetato de amonio1N
Potasio intercambiable		(Espectrofotómetro de emisión atómica)
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)		Acetato de amonio1N (Espectrofotómetro de emisión y absorción atómica) volumetría
Nitrógeno total	%	Kjendahl
Materia orgánica	%	Walkley y Black
Fosforo disponible	Ppm	Espectrofotometría UV-visible

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos LAFASA.

3.3.7.2 Datos meteorológicos

Las variables climáticas (Precipitación Pluvial, Temperaturas Máximas y Mínimas) fueron registradas cada día durante todo el periodo de investigación, con la ayuda del SENAMHI (Servicio nacional de meteorología e hidrología) de la estación de Caranavi situada a una altitud de 600 msnm; entre los paralelos (67°34' N y 15°50' S), periodo Noviembre 2021 a Mayo 2022.

3.3.7.3 Evaluación de variables agronómicas

Para evaluar las variables de altura de planta, diámetro del se seleccionaron cuatro plantas al azar por cada unidad experimental, las cuales fueron marbeteadas para realizar el seguimiento de evaluación. El registro de los datos correspondientes a estas variables se realizó al inicio del estudio y al final de la investigación lo que quiere decir que se realizó dos evaluaciones.

- Registro de altura de las plantas de café (m)

La primera evaluación se inició en noviembre y culminó el mes de mayo después de aplicar las diferentes dosis de cal dolomita, Para esto se tomaron las cuatro plantas marbeteadas, de cada unidad experimental y se midió con la ayuda de una cinta métrica, desde la base del suelo hasta el ápice de la planta. Los resultados se expresaron en metros.

- Registro de datos de diámetro de tallo de café (mm)

Esta variable también fue evaluada en noviembre y en mayo, con la ayuda de un vernier se midió el diámetro del tallo a los 10 cm del punto de inserción de la planta y se expresó en mm, para cuatro plantas seleccionadas al azar de cada unidad experimental coincidiendo justo antes de las primeras ramas en su gran mayoría.

3.3.8 Trabajo de gabinete (Fase final)

En esta fase se realizó el procesamiento, análisis e interpretación de los datos obtenidos en campo y en laboratorio.

a) Análisis de varianza (ANVA): Se realizó mediante el programa estadístico infoStat considerando el nivel de significancia al 5 %, para determinar si existe o no diferencias significativas entre promedios de tratamientos.

b) Prueba de comparación de medias Duncan: Se utilizó cuando el análisis de varianza mostró diferencias significativas en cualquiera de las variables para comparar las medias obtenidas por el tratamiento a un nivel de significancia de 5%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Características físicas y químicas del suelo en estudio

Con los resultados de los análisis en el laboratorio (LAFASA).de la Facultad de Agronomía (UMSA), se procedió a la interpretación de los valores de los diferentes nutrientes

4.1.1 Características físicas

La tabla 14, nos detalla las características físicas del suelo en estudio donde contiene arena al 23 % y 45%, limo arcilla 32 % respectivamente, observándose que el suelo tiene bastante arcilla presenta mayor cohesión y es muy pegajoso al mojarse.

Sin embargo Bernal *et al.*, (2015), menciona que los suelos de textura arcillosa poseen un drenaje más deficiente que los de textura limosa o arenosa. Los suelos clasificados como francos presentan un mejor equilibrio entre estas partículas y favorecen el desarrollo de las raíces, mientras que en los suelos arenosos y arcillosos ocurre lo contrario.

La condición óptima de suelo para el cultivo de café es textura franca; pero se adapta a suelos desde Franco Arcillosos hasta Franco Arenoso, con pendiente suave del cinco a 12 % (Arcila *et al.*, 2007).

Según Ayre (2016), señala que los tipos de suelos adecuados para el cultivo de café son de textura franca (con buena fertilidad, drenaje y aireación), de pH ácido a ligeramente ácido, buena profundidad efectiva y adecuado contenido de Materia Orgánica.

Así mismo Taxa (2015), en su investigación afirma que la textura Franca al tener cantidades iguales de arena, limo y arcilla, son las mejores texturas para cualquier tipo de cultivo. Estos autores confirman que la textura Franca del suelo es la adecuada para el cultivo de café.

De acuerdo a Gómez *et al.*, (2018), mencionan que en suelos con alta presencia de arenas se propicia un drenaje rápido del agua de lluvia. Cabe señalar que, para obtener una producción de café de forma sustentable, el suelo debe tener una textura arcillosa (Aranda, 2010).

Por otro lado la Tabla 15, muestra que la densidad aparente es de 1.053 gr/cc menor a 1.9 g/ml lo cual no es un suelo compacto favoreciendo el desarrollo de las raíces. Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces tal como indica (Donoso, 1992).

Sadeghian (2008), menciona que la densidad aparente se emplea generalmente como indicador de la compactación del suelo. Un rango adecuado para el crecimiento radical del café está entre 0,8 y 1,0 g/cm³. y no deseables aquellos superiores a 1,2 g/cm³.

Tabla 14. Características físicas de suelo

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Propiedades físicas		
Arena	%	23
Limo	%	45
Arcilla	%	32
Clase textural		Franco arcilloso
Densidad Aparente	g/cm ³	1.053

4.1.2 Características químicas

4.1.2.1 (pH)

El suelo en estudio presenta un pH igual a 4,75 catalogado como fuertemente ácido (Chilon 1997). El nivel de pH del suelo en estudio es menor a 5,5 (figura 7), considerado como el nivel mínimo aceptable para el crecimiento y desarrollo de las plantas, bajo esas condiciones existe tanto deficiencia como grandes limitaciones para la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y bases cambiables (Ca⁺², Mg⁺², K⁺ y Na⁺).

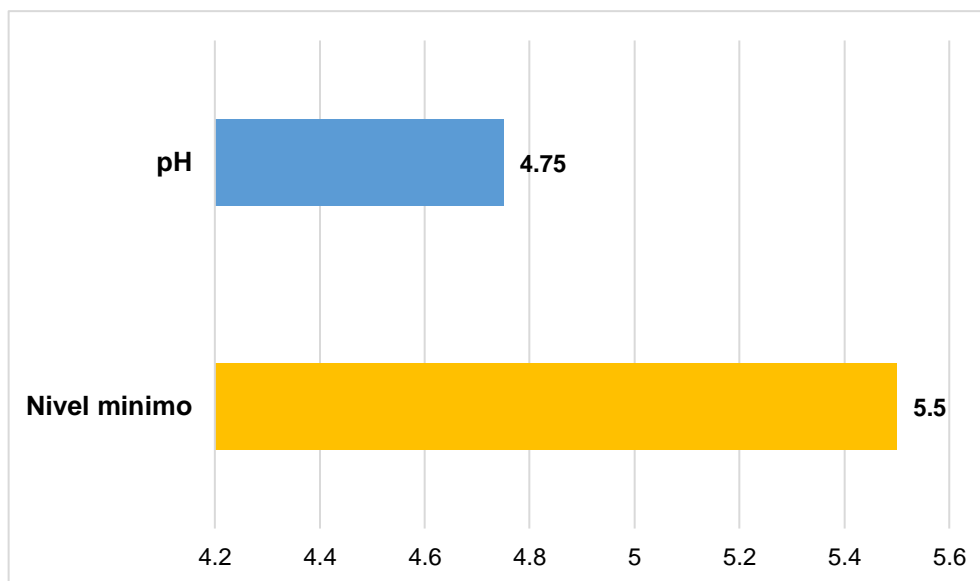
Cuando el suelo presenta un pH < 5,5 se encuentra en un proceso de acidificación (FAO y GTIS, 2015). Un suelo ácido tiene limitada la disponibilidad y absorción de nutrientes minerales para las plantas.

Es así como cuando el pH del suelo baja a niveles distintos al óptimo (pH=5,5), la planta tiene serias limitaciones para desarrollar normalmente su sistema radicular, afectando la absorción de agua y nutrientes (Bernier y Alfaro, 2006).

Duicela (2011), reporta que los suelos aptos para cultivo de café deben tener un pH ligeramente ácido entre 5.5 y 6.5 e indica que valores de acidez de < 5 o por encima de 6.5 dificulta la nutrición de los cafetales.

Entre más alta sea la concentración de H⁺ menor será el valor del pH y mayor la acidez. Para café el rango adecuado de pH se encuentra entre 5,0 y 5,5. La disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, se reduce conforme disminuye el pH, mientras que se incrementa el aluminio tal como indica (Sadeghian, 2008).

Figura N° 7. pH del suelo en estudio



4.1.2.2 Acidez intercambiable

El suelo en estudio presenta 1,41 (meq/100 g) de Acidez intercambiable catalogado como muy alto, además el (%) de saturación del aluminio es de 35,74 % de igual manera catalogado como alto (Chilon, 1997). Entre más bajo el pH del suelo habrá más Al⁺³ y las altas concentraciones de aluminio intercambiable resultando toxicas para la planta (CENICAFE, 2016).

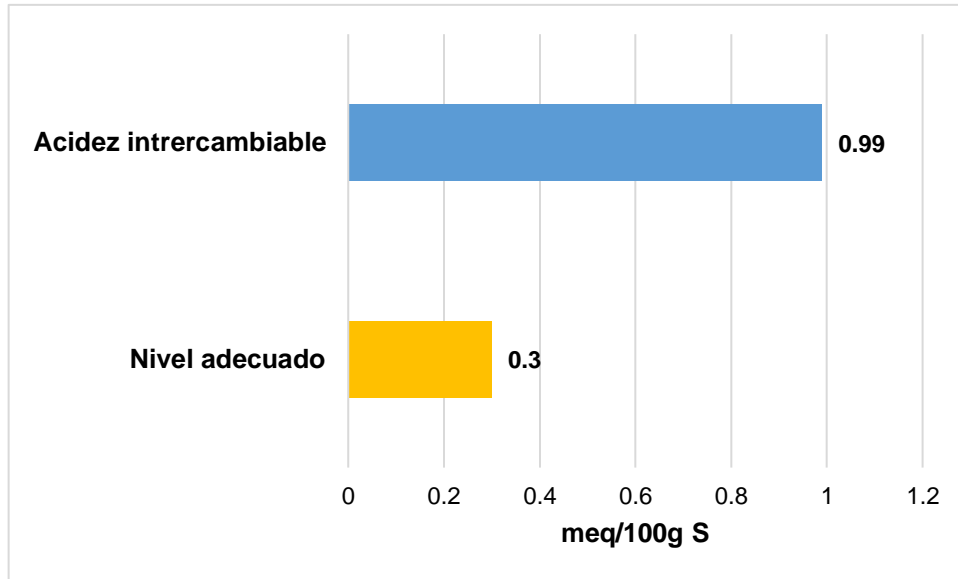
Cuando el valor de la acidez intercambiable es mayor a 0,5 meq/100grS, la mayoría de las plantas puede presentar problemas de crecimiento. El valor óptimo de acidez intercambiable debería ser a 0,3 meq /100gS.(Eloy y Alfredo s.f).Tal como se observa en la figura 8.

Según Molina y Meléndez (2002), la acidez intercambiable corresponde a Al y el H intercambiables y en la solución del suelo, que son los que pueden perjudicar el crecimiento de las plantas. Cuando el valor de acidez intercambiable es mayor de 0,5 meq/100gS algunas plantas pueden presentar problemas moderados de crecimiento, y un contenido mayor a 1 meq/100gS se considera muy alto. El valor óptimo de acidez intercambiable debería ser inferior a 0,3 meq/100gS.

Por otra parte Chilon (1997), indica que el Al^{3+} intercambiable es parte de la acidez intercambiable y está a su vez es parte de la CICE del suelo. El nivel máximo de Al^{3+} intercambiable tolerable en el suelo es de 20%, concentraciones mayores son tóxicas para las plantas.

Chapman (1966), asegura al respecto que niveles absolutos de 2 a 3 meq/100gS pueden ser peligrosos para la mayoría de los cultivos y Webber *et al.* (1982) indican que concentraciones de aluminio intercambiable superiores a 0.1 meq/100gS de suelo los efectos del aluminio se hacen presentes en algunos cultivos sensibles.

Figura N° 8. Aluminio intercambiable del suelo en estudio



4.1.2.3 Bases intercambiables

La suma de las bases intercambiables llegó a 1,36 (meq/100 g) el cual indica un valor bajo (figura 9) y describe un 49,09 % de saturación de bases catalogada como Medio (Chilon, 1997). En esas condiciones, no sólo hay una baja cantidad o concentración de nutrientes, sino también, por el nivel de pH los cationes de cambio (nutrientes minerales) no están disponibles, entonces los cultivos no tienen las condiciones para crecer y desarrollarse, afectando seriamente a la producción de alimentos.

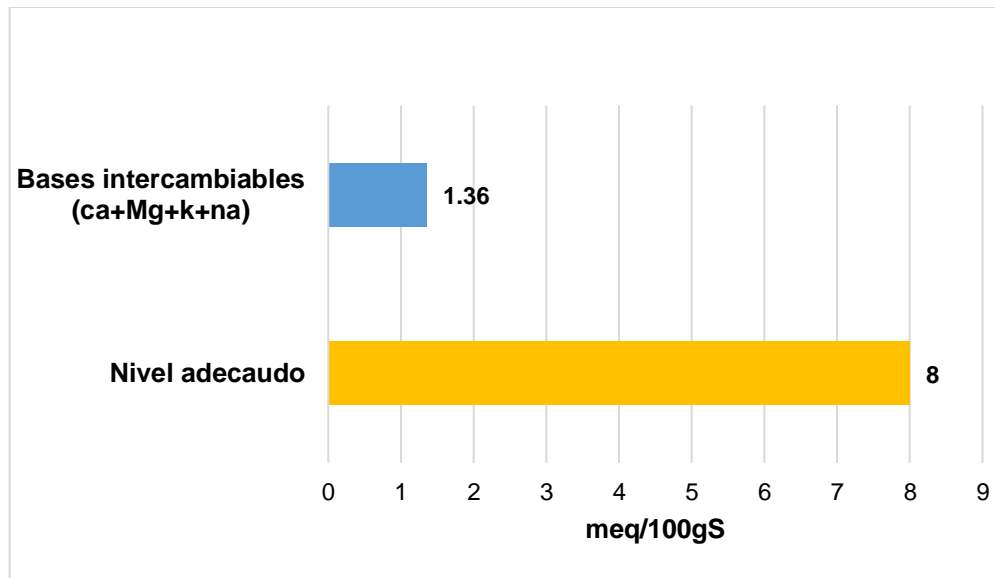
La fertilidad de un suelo está delimitada en gran parte por la presencia de bases intercambiables. De esta forma, la suma de bases (ca+mg + k) es un criterio importante para establecer el grado de fertilidad de un suelo y diagnosticar los problemas de acidez.

De acuerdo a Eloy y Alfredo (s.f), una suma de base inferior a 5 se considera un valor bajo que podría afectar el crecimiento de las plantas y que generalmente este asociado con problemas de acidez.

Por otra parte Sadeghian (2008.), menciona que el Calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) intercambiables son macronutrientes llamados bases intercambiables. Donde los niveles adecuados para café son: Ca mayor de 3,0 cmolc /kg, Mg mayor de 0,9 cmolc /kg y K mayor de 0,4 cmolc /kg.

Así mismo Sanchez (2013), indica que un suelo apto para café debe tener adecuadas propiedades químicas: pH entre 4.5 a 5.5; suma de bases mínimo 8 cmol/kg; 60 % de saturación de bases, 35 g/kg de materia orgánica; 4 cmol/kg de calcio y 1 cmol/kg de 29 magnesio.

Figura N° 9. Bases intercambiables del suelo en estudio



4.1.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

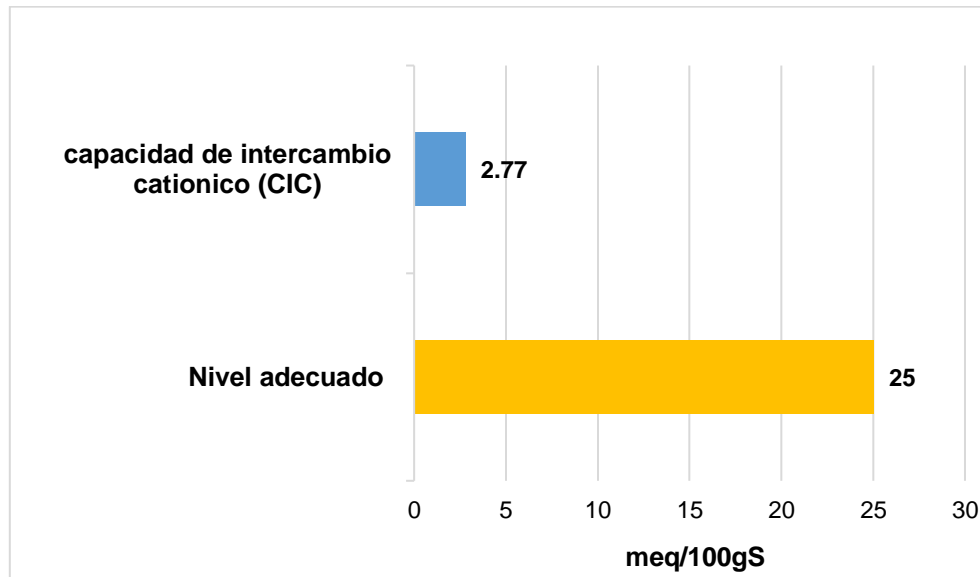
De acuerdo con la figura 10 el suelo en estudio describe un valor de 2,77 meq/100gS catalogado como bajo. La CIC nos indica la capacidad de un suelo de almacenar en sus coloides, nutrientes de carga positiva o cationes, o dicho de otro modo, nos da la cantidad de cargas negativas del suelo. Suelos con una alta CIC mayores a 6,0 meq/100gR son más fértiles que los de baja CIC menores a 3,0 meq/100gr S (CENICAFE 2007).

Así mismo Padilla (2007), considera que los suelos con alta CIC > 20 meq*100g⁻¹ de suelo, son categorizados como más fértiles, ya que pueden retener más nutrientes que fueron absorbidos por las plantas o lixiviados fuera de la zona radicular.

En ese mismo contexto Márquez (2015), en su investigación realizada menciona que el rango normal en América para la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es de 13.92 a 18.56 (meq/100 gr), tomando este rango establecido como un nivel óptimo para el crecimiento de las plantas en el cultivo de café, cumpliendo con los rangos establecidos en los resultados de las tesis evaluadas. De acuerdo con Agrobanco (2012), en su Guía

Técnica afirma que el rango óptimo de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) para el cultivo de café varía de 13 y 25 (meq/100 gr) (rango medio).

Figura N° 10. CIC del suelo en estudio



4.1.2.5 Materia orgánica y nitrógeno total

El contenido de nitrógeno total se encuentra directamente relacionado con el contenido de materia orgánica del suelo. Si un suelo es rico en materia orgánica lo es en nitrógeno y viceversa.

De acuerdo a la figura 11 se puede apreciar que el suelo en estudio presenta 0,25 % de Nitrógeno total y 4,98 % de materia orgánica, de acuerdo a estos resultados podemos identificar que tienen niveles altos (Chilon, 1997). Interfiriendo la absorción de nitrógeno, hierro y zinc, como resultado deficiencia de estos elementos. También provoca el taponamiento de los macroporos, lo que produce una menor tasa de difusión del oxígeno, llegando a estresar las raíces al no poder absorber agua.

Según IHCAFE (2001), determina que el valor promedio que se maneja para el café es de 0.2% a 0.5%.de nitrógeno total. Por otro lado, los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 8%.

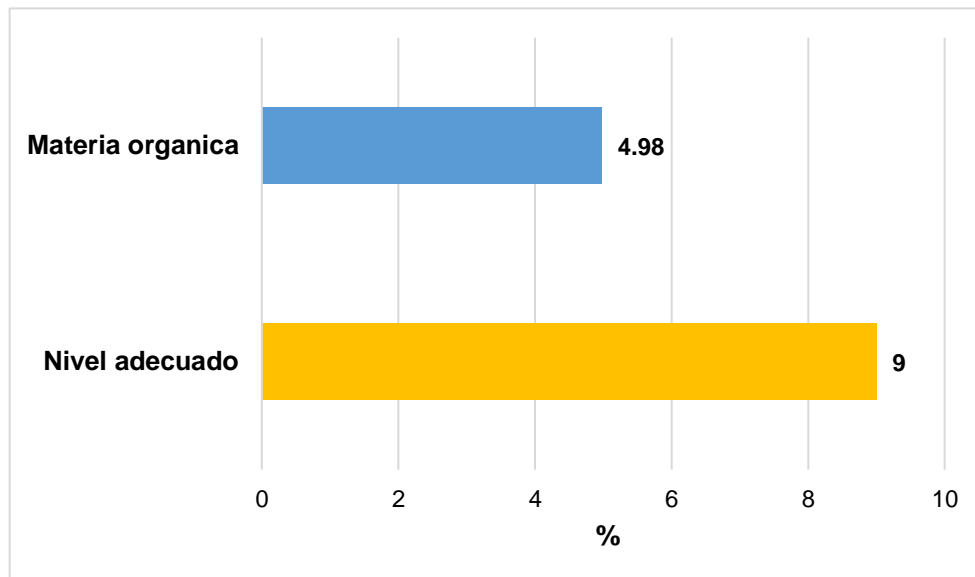
Molina y Meléndez (2002), indican que la materia orgánica mejora muchas propiedades químicas, físicas y microbiológicas que favorecen el crecimiento de las plantas. Los

suelos con menos de 2% de materia orgánica tienen bajo contenido, y de 2 a 5% es un contenido medio, siendo deseable que el valor sea superior a 5%.

De acuerdo a Agrobanco (2012), en su Guía Técnica afirma que el rango óptimo de la materia orgánica para el cultivo de café varía entre de 2 y 4 % (rango medio).

La Materia orgánica representa el contenido del humus del suelo. Este componente se emplea como indicador de la disponibilidad de nitrógeno. Para el cultivo de café en Colombia, contenidos menores de 8% se consideran bajos, y niveles inferiores al 6% son muy bajos (CENICAFE 2016).

Figura N° 11. Materia Orgánica en estudio



4.1.2.6 Fósforo asimilable

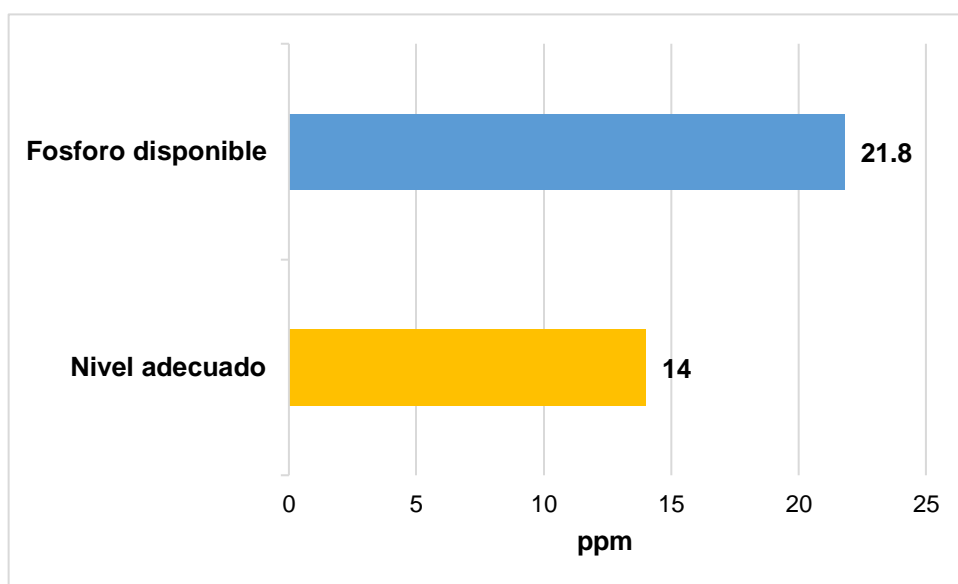
La figura 12 nos muestra que el suelo en estudio presenta 21,80 ppm de Fósforo asimilable. De acuerdo a este resultado podemos identificar que se tiene un nivel alto (Chilon, 1997). De acuerdo a Agrobanco (2012), en su Guía Técnica afirma que el rango óptimo del fosforo para el cultivo de café varía de 7 y 14 ppm (rango medio); por lo cual los resultados de las tesis evaluadas están dentro del rango óptimo para cultivos de café.

Según Oirsa (2000) la recomendación para el cultivo de café es de un contenido de fósforo entre 10 a 40 ppm. Mientras que Valecia & Bravo (1975), menciona que para el

correcto crecimiento del café es necesario que exista una disponibilidad de nutrientes adecuada, con niveles de 6 a 14 ppm de fósforo disponible en el suelo también que tengan sistemas de amortiguamiento que regulen la concentración de los nutrientes.

Por otro lado, Sadeghian (2019), considera disponible para las plantas niveles menores de 10 mg/kg se clasifican como bajos y mayores de 30 mg/kg altos. Sin embargo de acuerdo a la escala de interpretación de análisis de suelos para café presentada por Palma 1991 y complementada por Moya y Zantua (1991) ,esta escala determina que el rango optimo está entre 5 y 15 ppm (rango normal) de fósforo (P).

Figura N° 12. Fósforo disponible del suelo en estudio



4.2 Comportamiento climático durante el periodo de evaluación

Se realizó la evaluación de los parámetros climáticos con la finalidad de conocer su influencia sobre la aplicación de cal dolomita y el desarrollo del cultivo de café.

4.2.1 Comportamiento de la precipitación en el proceso del encalado

Los datos de temperatura ambiental, máxima y mínima fueron obtenidos del SENAMHI (Servicio nacional de meteorología e hidrología) de la estación de Caranavi situada a una altitud de 600 msnm; entre los paralelos (67°34' N y 15°50' S), periodo Noviembre 2021 a Mayo 2022.

La figura 13 describe que durante el proceso del encalado, los meses de mayor precipitación son diciembre y enero con 174 y 178 mm respectivamente y los meses de menor precipitación son abril con 92 mm y mayo con 34 mm. Resaltando que la humedad disponible es indispensable para el crecimiento vegetativo, por eso es importante prever el riego en la época seca para garantizar el desarrollo de las plantas de café que generalmente esta fase coincide con la época seca.

Según Salamanca (1999), la cal requiere humedad para poder reaccionar, la época más apropiada para aplicarla es a principio de las lluvias o un poco antes. Sin embargo, no hay limitaciones en cuanto a la época de aplicación, siempre y cuando haya humedad en el suelo y que no coincida con el ciclo de fertilización del cultivo.

El efecto de la cal es muy variable y depende del clima (a mayor precipitación, menos duración del efecto), topografía (suelos con mayor pendiente son susceptibles a mayor lavado) y depende del tipo de cultivo.

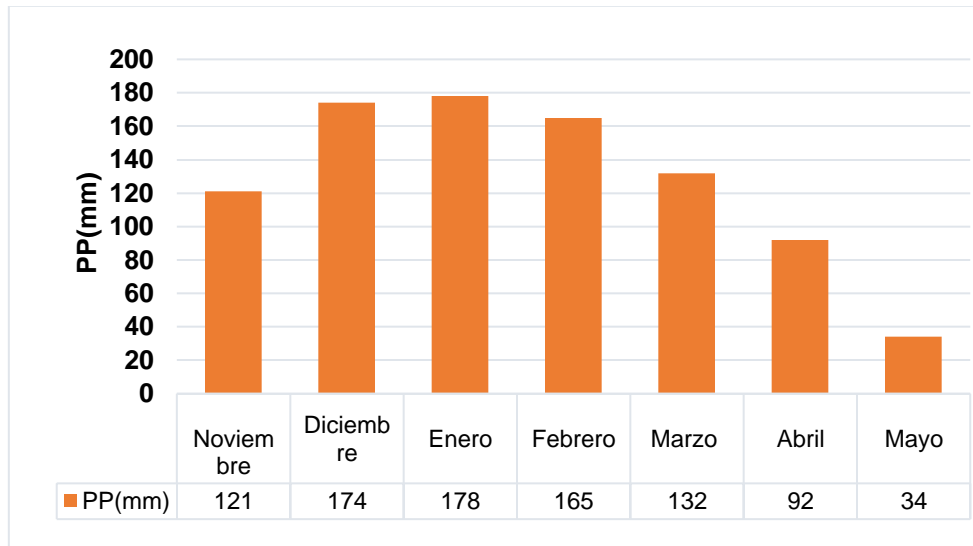
Generalmente se espera que los efectos benéficos del encalamiento de suelos ácidos duren varios años. Sin embargo, los efectos residuales por lo general duran menos en las regiones tropicales que en las templadas debido a la mayor precipitación y a las temperaturas más altas tal como indica (Sánchez y Salinas, 2008).

Alégre (1959), menciona que el café arábica puede desarrollarse en rangos de precipitación entre 800 mm y 2,500 mm anuales con rango óptimo de 1,200 y 1,800 mm. El IICA (1995), indica que el desarrollo del café requiere precipitaciones entre 1,000 y 2,800 mm anuales.

Por otro lado, Jaramillo y Guzmán (1984), mencionan que cuando se dan precipitaciones inferiores a 1,000 mm se limitan el crecimiento de la planta y el desarrollo de los frutos, y sí se da una sequía prolongada el presentan amarillamiento y fuerte defoliación, si las precipitaciones son por arriba de los 3,000 mm anuales se da incremento de enfermedades y pérdida de nutrientes del suelo.

Ledent (2002), indica que cuando se presenta estrés hídrico en la planta, el déficit hídrico estimula la abscisión de las hojas por aumento de la síntesis y sensibilidad al etileno.

**Figura N° 13. Precipitación pluvial en el cantón de Taipiplaya
(Noviembre 2021 - Mayo 2022)**



4.2.2 Comportamiento de la temperatura en el proceso del encalado

De acuerdo a la figura 14, se puede apreciar que las temperaturas más altas se registran en los meses de noviembre y enero con 25,7 y 23,6 °C respectivamente; mientras que las temperaturas más bajas se registraron en los meses de abril alcanzando 15,5 °C y mayo con 13,7 °C.

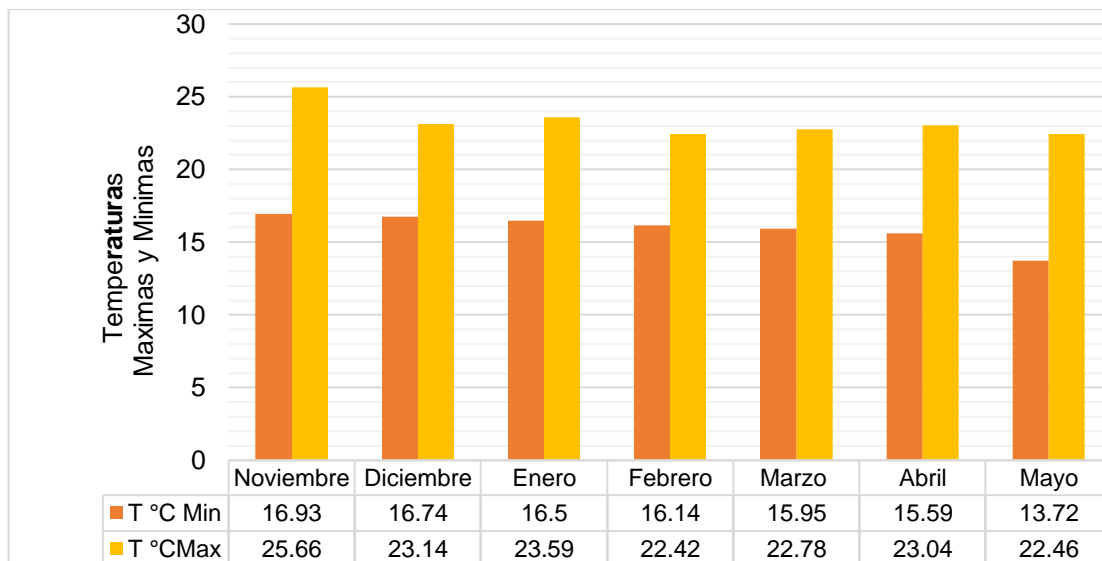
Los límites de tolerancia del Café para temperaturas bajas en el cual no hay crecimiento se encuentran entre 8°C y 14°C aproximadamente, por lo tanto, 10°C podría ser considerado como temperatura base inferior en café. Los límites de temperaturas altas en los cuales el crecimiento se detendría varían entre 30°C y 33°C un valor de 32°C consideraría como el límite de tolerancia superior (Jaramillo y Guzmán, 1984).

La temperatura es el elemento más relacionado con el crecimiento de la plantas, las temperaturas bajas propician un desarrollo lento, por otra parte las temperaturas altas pueden acelerar el crecimiento vegetativo.

Al respecto Monroig 2015, menciona que el café de la especie *Coffea arábica* crecen y se desarrollan mejor bajo temperaturas que fluctúan entre los 15,6 a 23,9 °C, siendo esta última la ideal para el cultivo.

También Guharay *et al.*, (2000), considera que las alturas óptimas para el cultivo de café están entre 900 y 1200 msnm, en las regiones tropicales a dichas alturas normalmente se presenta un rango de temperatura de 17°C a 23°C que es óptimo para el cultivo de café.

Figura N° 14. Temperaturas máximas y mínimas en el cantón de Taipiplaya (Noviembre 2021 – Mayo 2022)



4.3 Efecto de la dolomita en las propiedades químicas del suelo

4.3.1 pH del suelo

Respecto al pH del suelo tal como se muestra en la figura 15, al inicio de la investigación se reportó un valor de 4,75 que corresponde a un rango fuertemente ácido, el cual se mantiene de forma similar en el tratamiento testigo (T1) con un valor de 4,43 hasta el periodo final de la evaluación. Tal como indica Bernier y Alfaro (2006), cuando el pH del suelo baja a niveles distintos al óptimo (pH=5,5), la planta tiene serias limitaciones para desarrollar normalmente su sistema radicular, afectando la absorción de agua y nutrientes.

Sin embargo, las aplicaciones de las diferentes dosis de dolomita ha permitido subir el pH, especialmente cuando se usó la dosis de 528kg/ha (T3) a pH de 6,24 que corresponde a un rango moderadamente ácido mejorando las condiciones de disponibilidad de nutrientes cuyo rango óptimo de pH oscila entre 5.0 y 7.0, así mismo, un encalamiento hasta la neutralidad puede formar el fosfato de calcio insoluble, de esta manera el fósforo no estaría disponible para la planta, en el caso de micronutrientes como el boro y zinc también disminuyen su disponibilidad. Por lo tanto, no siempre será recomendable alcanzar la neutralidad, pudiendo verificarse el sobre-encalado.

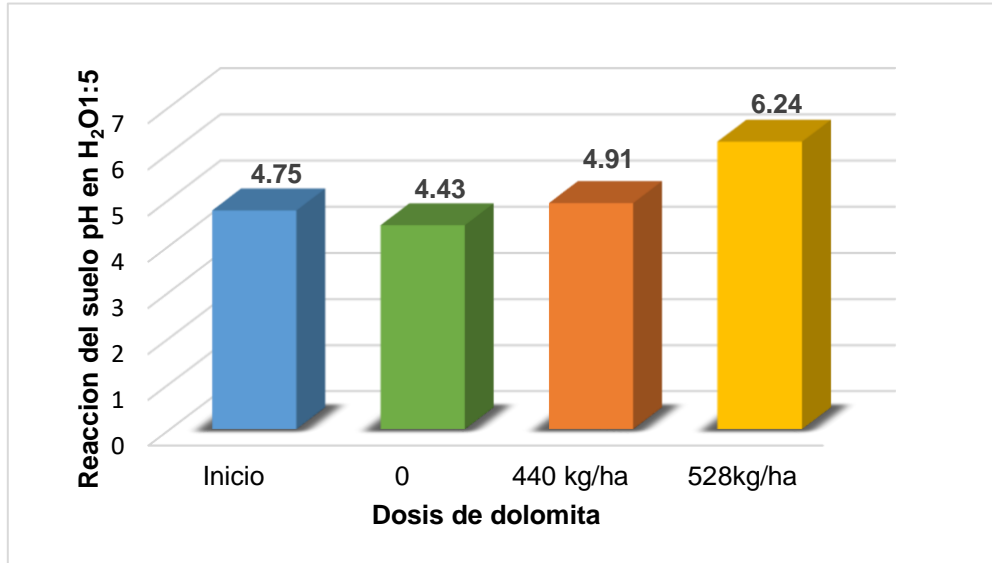
Mientras que la aplicación de 440 kg/planta (T2) también logro incrementar el pH hasta un nivel muy fuertemente ácido (4,91), siendo el verdadero responsable el efecto del encalado proveniente de la disolución de los carbonatos responsable de la elevación del pH que al hidrolizarse produce iones hidroxilo, y estos son los que elevan el pH del suelo (Corpoica, 2005).

Según Espinoza (2001), quien refiere que el efecto final de las reacciones de la dolomita reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H^+ en H_2O .

También varios autores mencionan que tanto cal o dolomita son las dos alternativas para reducir o neutralizar la acidez del suelo y esto hace que, sugiere el uso de enmiendas; sea a través de la adición de cenizas o cal (Alvarado, 2004).

Cepeda (1991), sustenta que el encalado sube el pH del suelo; esto ocurre debido a que el calcio reemplaza iones de H^+ en el complejo de intercambio catiónico, los iones H^+ se combinan con los iones hidroxilos para formar agua. En esta forma el pH aumenta debido a que la concentración de los iones H^+ que son la fuente de acidez del suelo disminuye.

Figura N° 15. Variación del pH a los 180 días de aplicación de dolomita



El Análisis de Varianza (ANVA) para la variable de acidez (pH) del suelo luego del encalado presentó los siguientes resultados.

Tabla 15. Análisis de varianza del efecto del encalado en el pH

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Bloque	0,13	2	0,07	0,77	0,5229	Ns
Dosis	5,32	2	2,66	30,91	0,0037	**
Error	0,34	4	0,09			
Total	5,79	8				

C.V.= 5,65 %

De acuerdo al ANVA, se puede apreciar que en bloques no se obtuvo diferencias significativas, esto indica que la pendiente no tuvo efecto directo sobre el pH del suelo, es decir que entre los bloques se identificaron los mismos pH.

Por otra parte, para dosis se obtuvo diferencias altamente significativas al uno por ciento de significancia ($p < 0,01$), considerándose que las dosis de dolomita, permitió diferencias en el pH del suelo, por lo tanto se realizó una prueba Duncan que se detalla posteriormente.

El coeficiente de variación fue de 5,65 % señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 16. Comparación de medias Duncan para la variable pH del suelo

Dosis de dolomita	pH	Duncan (5%)
528 kg/ha	6,24	A
440 kg/ha	4,91	B
TESTIGO	4,43	B

Se detalla la prueba Duncan en la tabla 16, para las tres dosis de dolomita empleadas en la presente investigación, se observa que la dosis 528 kg/ha(T3) fue la que mejor promovió el incremento del pH del suelo en 6,24 en cambio la dosis 440kg/planta (T2) y el T1 (testigo) mostraron ser estadísticamente similares, es decir que aquellas plantas de café a las que no se aplicó ninguna dosis de cal dolomita comparados con el nivel de dosis más alto no mostraron diferencias significativas, con valores de 4,91 y 4,43 pH del suelo, respectivamente.

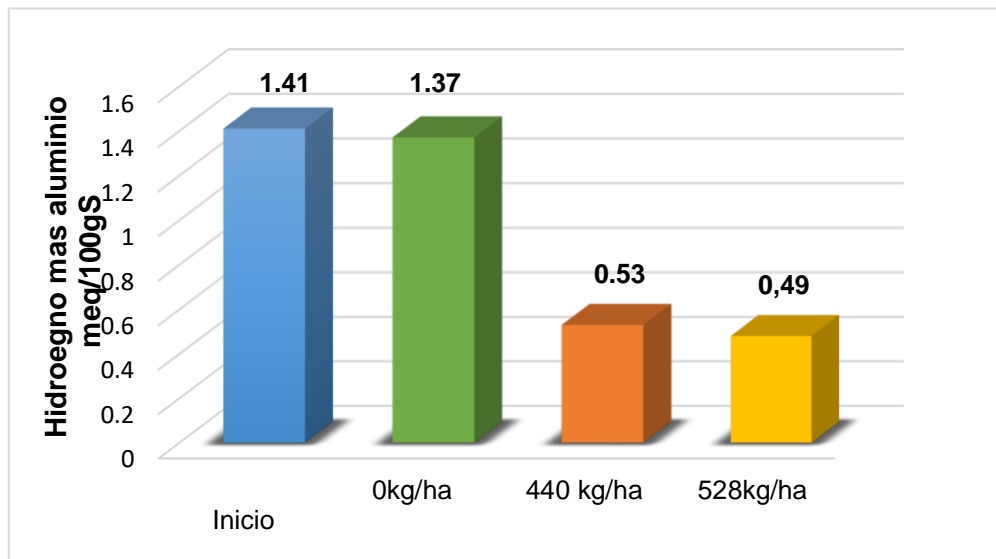
4.3.2 Acidez intercambiable del suelo

La práctica del encalado busca neutralizar la fitotoxicidad de la acidez intercambiable o soluble y pasar a una forma insoluble formando la gibsita que es un material sólido que precipita, en esta forma el aluminio ya no es tóxico para las plantas. En la presente investigación se buscó neutralizar 1,43 meq/100 g de acidez intercambiable.

Se presenta en la figura 16, el efecto logrado por la aplicación de la dosis de dolomita. Donde todos los tratamientos permitieron reducir la acidez intercambiable del suelo excepto el testigo. La dosis aplicada de 528 (T3) y 440 kg/ha (T2) alcanzaron valores de 0,49 y 0,53 meq/100gS, fueron los tratamientos más eficientes en la neutralización de la acidez intercambiable.

En cambio, el testigo (testigo) T1, no logro neutralizar la acidez intercambiable, manteniéndose en el nivel inicial, fue el menos eficiente. Agregando a lo anterior

Figura N° 16. Variación en la acidez intercambiable a los 180 días de aplicación de dolomita



Kamprath *et al.*, (1979), indica que ocurre una disminución en el contenido de la acidez intercambiable a medida que se incrementan las cantidades de material encalante.

Así mismo Ortiz (2008), menciona que la adición de enmiendas con compuestos de calcio y magnesio, disminuyen la acidez en un suelo ácido y el porcentaje de saturación de acidez intercambiable.

Por otro lado Bohn (2002), afirma que altos niveles de aluminio en el suelo reducen el crecimiento de raíces inhibiendo su elongación y penetración en el suelo, reduciendo la absorción de agua y nutrientes

También Fassbender (1987), manifiesta que los iones que generan la acidez como aluminio, hidrogeno y manganeso influyen negativamente sobre la adición de otros cationes e inhibe el desarrollo de las raíces afectando directamente a la nutrición vegetal de la planta y principalmente a la producción.

No obstante, el encalado con niveles de aplicación de cal desplaza a los iones que generan la toxicidad entre Al^{+3} e H^{+} , donde la solubilidad de las mismas disminuye dando condiciones óptimas a los cultivos. Espinoza (2003), quien reporta que el efecto final de las reacciones de la cal dolomita es reducir la acidez del suelo, al convertir el exceso de

H⁺ en H₂O. El incremento de pH permite la precipitación del Al⁺³ como Al(OH)₃, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al⁺³.

Variación en la acidez intercambiable a los 180 días de aplicación de dolomita

En base a la acidez intercambiable se procedió a realizar el ANVA, logrando los siguientes resultados

Tabla 17. Análisis de varianza de la acidez intercambiable

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Bloque	0,09	2	0,04	1,17	0,3993	Ns
Tratamiento	1,55	2	0,77	20,24	0,0081	**
Error	0,15	4	0,04			
Total	1,79	8				

C.V.= 24,87%

El ANVA nos muestra que en bloques no se obtuvo diferencias significativas, esto indica que la pendiente no tuvo efecto directo sobre la acidez intercambiable del suelo, es decir que entre los bloques se identificaron los mismos (Tabla 17 figura 16).

Por otra parte, para dosis se obtuvo diferencias altamente significativas al uno por ciento de significancia ($p < 0,01$), considerándose que las dosis de cal dolomita, permitió diferencias en el Al⁺³ del suelo, por lo tanto, se realizó una prueba Duncan que se detalla posteriormente.

El coeficiente de variación fue de 24,87 % señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

En la tabla 18 y la figura 16, se detalla la prueba Duncan, para las tres dosis de cal dolomita utilizadas en la presente investigación.

Tabla 18. Comparación de medias Duncan para la variable acidez intercambiable

Dosis de dolomita	(A+H) meq/100gS	Duncan (5%)
528 Kg/ha	0,49	B
440Kg/ha	0,53	A
TESTIGO	1,37	A

En la prueba de medias Duncan que se puede observar la tabla 19, el contenido de acidez intercambiable neutralizado en los tratamientos en estudio se determinan dos grupos; el primer está conformado por el tratamiento T3 (0,49meq/100gS) y T2 (0,53meq/100gS) que son estadísticamente similares y por último el tratamiento Testigo T1 (1,37meq/100gS) con los valores más altos, donde se puede evidenciar que a medida que se incrementan los niveles de cal dolomita se reduce la acidez intercambiable del suelo.

4.3.3 Calcio intercambiable del suelo

En relación al contenido de calcio intercambiable, al inicio del proceso de encalado fue de 0.85 meq/ 100g. Sin embargo durante la aplicación de cal dolomita el contenido de calcio intercambiable ascendió gradualmente hasta finalizar proceso, en los tratamientos T2 y T3 registrando valores de 3,8 y 4,3 meq/100g S respectivamente. Por otra parte, el T1 (testigo) con 1,37 meq/100gS no logro ascender manteniéndose en la misma magnitud. que el valor inicial.

Según lo anteriormente descrito se puede afirmar que aplicar cal dolomita permite neutralizar la acidez del suelo (1 mol de dolomita se neutralizan 4 moles de H^+) por medio del anión carbonato (CO_3^{-2}); y a su vez aporta Mg^{+2} y Ca^{+2} a comparación de la cal (1 mol de $CaCO_3$, consume 2 moles de H^+) que tan solo aporta Ca^{+2} (Zapata.2004).

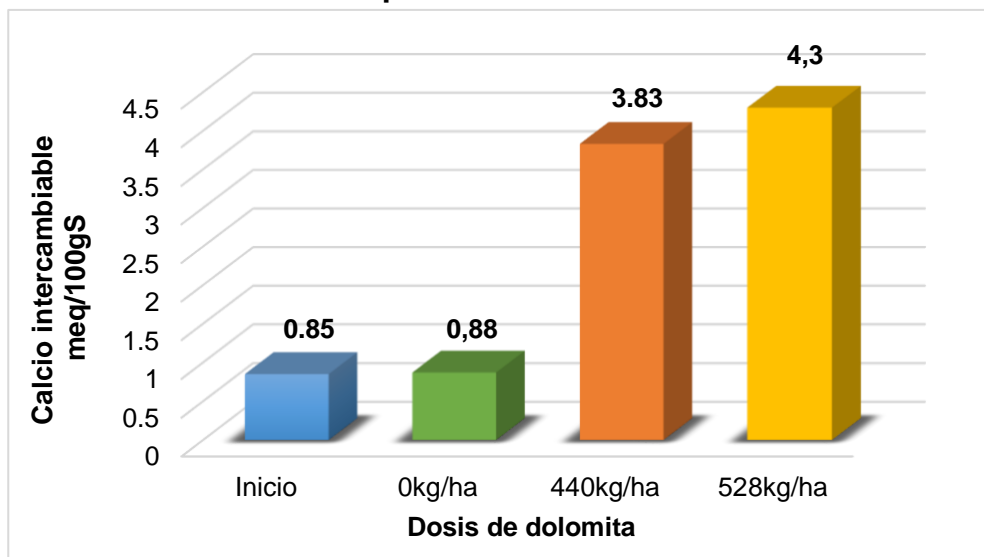
Por otra parte, la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2001), menciona que el calcio y el magnesio provenientes de la disolución de las enmiendas calcáreas no intervienen en las reacciones de incremento del pH Estos cationes pasan simplemente a ocupar sitios de intercambio catiónico.

El que realmente eleva el pH es el ión carbonato que se hidroliza y produce iones OH^- . Permitiendo la precipitación del aluminio como $Al(OH)_3$, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta manera el efecto tóxico del aluminio en las plantas.

Vega (2014), hace notar que al aplicar material encalante a suelos ácidos se modifica el pH, aumenta la disponibilidad de calcio del suelo, alcanzando a valores superiores para los cultivos, mejoran la estructura del suelo y la actividad microbiana.

El calcio puede ser suministrado por medio de diferentes fuentes, la calcita y la dolomita son excelentes fuentes de calcio. El añadir calcio y magnesio en suelos deficientes de potasio puede causar desbalance nutricional (Inpofos, 1997).

Figura N° 17. Contenido de calcio intercambiable a los 180 días de aplicación de dolomita



El Análisis de Varianza (ANVA) para la variable calcio intercambiable luego del encalado presentó los siguientes resultados.

Tabla 19. Análisis de varianza para calcio intercambiable del suelo

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	1,85	2	0,93	1,75	0,2844	Ns
Dosis	22,07	2	11,04	20,85	0,0077	**
Error	2,12	4	0,53			
Total	26,04	8				

C.V.= 24, 54%

El ANVA nos muestra que en bloques no se obtuvo diferencias significativas, esto indica que la pendiente no tuvo efecto directo para calcio intercambiable del suelo, es decir que entre los bloques se identificaron los mismos valores de ca (Tabla 19 figura 17).

Por otra parte, para dosis se obtuvo diferencias altamente significativas al uno por ciento de significancia ($p < 0,01$), considerándose que las dosis de cal dolomita, permitió

diferencias en ca intercambiable del suelo, por lo tanto se realizó una prueba Duncan al 5% que se detalla a continuación.

El coeficiente de variación fue de 24,54%, señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

En la tabla 20 y figura 17, se detalla la prueba Duncan, para las tres dosis de cal dolomita utilizadas en la presente investigación.

Tabla 20. Comparación de medias Duncan para la variable calcio intercambiable del suelo

Dosis de dolomita	Calcio Intercambiable Meq/100gS	Duncan (5%)
528Kg/ha	4,3	A
440Kg/ha	3,83	A
TESTIGO	0,88	B

La dosis (528 kg/ha) de cal dolomita que corresponde al T3 fue el que mejor promovió el incremento del calcio intercambiable del suelo. Por otro lado, la dosis (440 kg/ha) T2 alcanzo niveles de ca intercambiable casi similares, estadísticamente son diferentes. En cambio, el testigo (T1) presento los valores más bajos.

4.3.4 Magnesio intercambiable del suelo

Inicialmente el suelo en estudio presentaba un valor de magnesio intercambiable igual a 0,30 meq/100g consecuencia de deficiencia de magnesio y además un suelo con problemas de acidez. En la Figura 18, se presenta el efecto logrado por la aplicación de diferentes dosis de cal dolomita.

De manera general, todos los tratamientos permitieron incrementar el magnesio inicial del suelo. El mayor incremento se verificó con la dosis 528 kg/ha (T3) de cal dolomita, respecto al valor inicial presente del suelo.

En cambio, la dosis 440kg/ha (T2) permitió mejorar el contenido de mg en 2,62 meq/100gS. Sin embargo con el testigo (T1) no se mejoró el nivel inicial manteniéndose en la misma magnitud que el valor inicial con 0,33meq/100gS.

Estos resultados contrastan con los de Azabache (2003), quien menciona que grandes cambios en el Mg^{2+} cambiante pueden ocurrir después de agregar materiales encalantes de Mg. Primero, se incrementan los niveles de Mg^{2+} , pero conforme el pH se acerca a la neutralidad, el magnesio disminuye. La reducida absorción de Mg^{2+} en muchos suelos fuertemente ácidos, es causada por altos niveles de Al^{3+} cambiante. La saturación de Al de 65 – 70% esta frecuentemente asociado con deficiencia de magnesio.

Por otra parte, Abreu Jr. *et al.*, 2003; Fageria y Baligar (2008), afirma que la aplicación de cal dolomita no solo neutraliza la acidez del suelo, sino que también entrega calcio y magnesio al suelo situación que mejora la nutrición del cultivo y el balance de cationes en el suelo.

Además, la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2001), indica que el calcio y el magnesio provenientes de la disolución de las enmiendas calcáreas pasan simplemente a ocupar sitios de intercambio catiónico. El incremento de magnesio cambiante en el suelo está en relación directa con las dosis crecientes aplicadas de enmienda.

Es por esta razón que la práctica de encalado de suelos es una alternativa eficaz en suelos ácidos ya que además de corregir la acidez del suelo, también suple calcio y magnesio al cultivo. Por ser una enmienda que reacciona lentamente en el suelo, la dolomita mantiene un efecto residual prolongado, al contrario de los fertilizantes que son más solubles y susceptibles de perderse por lixiviación (Zapata, 2004).

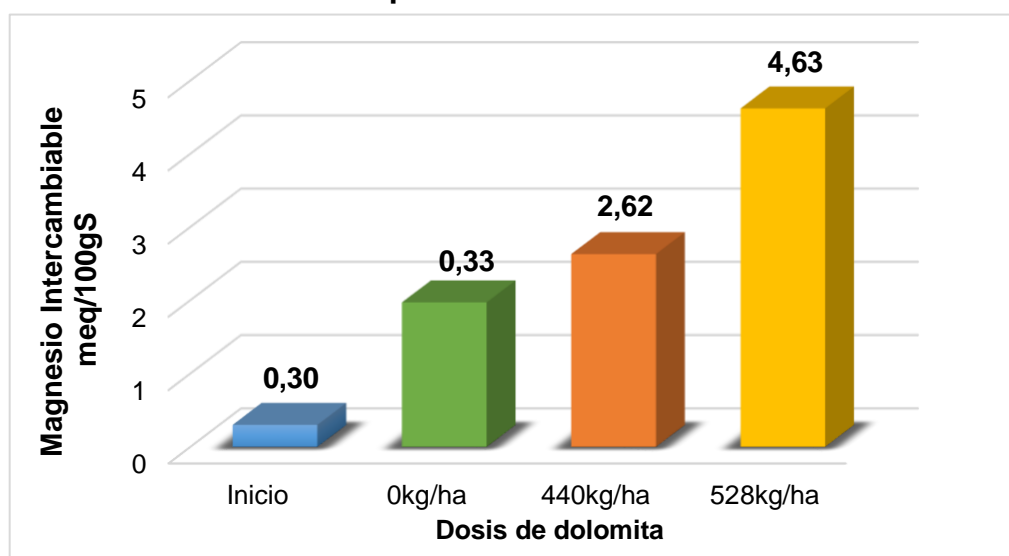
Un informe de Alvarado (2004), reporta que numerosos experimentos presentan evidencias de que la deficiencia de calcio y magnesio es parcialmente responsable de un pobre crecimiento de las especies vegetales en la mayoría de los suelos ácidos con concentraciones elevadas en aluminio intercambiable.

El magnesio es un elemento importante en la nutrición de las plantas ya que forma parte

de la molécula de la clorofila, además este nutriente participa en la fotosíntesis como activador de la respiración (Gil, 1995).

Agregando a lo anterior la molécula de clorofila contiene un ión magnesio en el núcleo de su compleja estructura. En consecuencia, el magnesio es vital para la producción de clorofila, y realización de la función fotosintética (Thompson y Troeh, 1994)

Figura N° 18. Contenido de magnesio intercambiable a los 180 días de aplicación de dolomita



En base al magnesio intercambiable se procedió a realizar el ANVA, logrando los siguientes resultados.

Tabla 21. Análisis de varianza para magnesio intercambiable del suelo

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	0,70	2	0,35	3,66	0,1247	Ns
Dosis	0,76	2	0,38	21,24	0,0018	**
Error	0,38	4	0,10			
Total	1,84	8				

C.V.= 27,72%

Según el análisis de varianza ANVA expresado en la tabla 21, nos muestra que no existen diferencias significativas entre bloques ($p > 0,05$) cabe decir que la pendiente no tuvo influencia sobre el magnesio disponible del suelo en ninguno de los bloques.

La aplicación de cal dolomita da lugar a diferencias altamente significativas al uno por ciento de significancia ($p < 0,01$), considerándose que las dosis de cal dolomita, permitieron diferencias en el contenido de mg intercambiable del suelo, por tanto el mejor tratamiento fue el tratamiento 3, por lo que se realizó una comparación de medias a través de la prueba Duncan al 5%.

El coeficiente de variación fue de 27,72%, señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

La tabla 22 y figura 18, se detalla la prueba Duncan, para las tres dosis de cal dolomita utilizadas en la presente investigación.

Tabla 22. Comparación de medias Duncan para la variable Magnesio intercambiable del suelo

Dosis de dolomita	Mg Intercambiable meq/100gS	Duncan (5%)
528 Kg/ha	4,62	A
440Kg/ha	2,62	B
TESTIGO	1,97	B

Se observa que el tratamiento 3 conformado por (528 kg/ha) cal dolomita determina que utilizando mayor cantidad de cal dolomita se conseguirá diferentes efectos en el contenido de mg intercambiable.

Por el contrario, el tratamiento 2 (440kg/ha) logro incrementar en 2,62 meq/100gS de mg intercambiable. Mientras el testigo (sin cal dolomita) fue el que menos contribuyó en incrementar el contenido de magnesio intercambiable con 1,97meq/100gS, siendo inferior al resto de los demás tratamientos.

4.3.5 Potasio intercambiable del suelo

Como se puede apreciar, el contenido de potasio intercambiable al inicio del estudio fue de 0,21 meq/100gS para todos los tratamientos. La información más detallada con respecto a esta variable se puede apreciar en la figura 19.

Durante el proceso del encalado el potasio intercambiable presento los siguientes resultados hasta los 180 días de finalizar el proceso, los tratamientos T2 (440) y T3 (528 kg/ha) de cal dolomita registraron valores de 0,36 y 0,44 meq/100gS respectivamente y el tratamiento testigo (T1) con un de 24meq/100gS. Es evidente que no hubo respuesta a los tratamientos en el contenido de potasio como se esperaba.

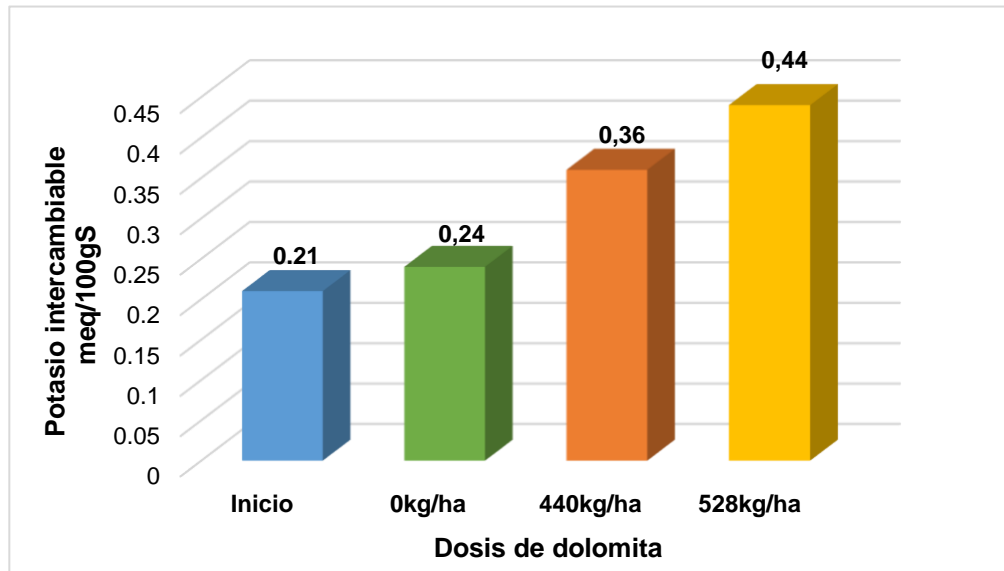
Azabache (2003), quien refiere que cuando los suelos ácidos son encalados, el aluminio intercambiable y los cationes hidroxialumínicos como $Al(OH)^{2+}$ son convertidos a formas insolubles de $Al(OH)_3$. Este cambio remueve al Al de la competición de intercambio catiónico con el K, y libera sitios de enlace bloqueados, de tal manera que el K puede competir con Ca por ellos. Como consecuencia, mayores cantidades de K pueden ser retenidos por los coloides de arcilla y removidos de la solución suelo.

Al respecto Navarro,(2003) mencionan lo contrario, el K de la solución del suelo esta inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata ,las plantas en crecimiento rápidamente extraen el K de la solución del suelo, pero a medida que el K es absorbido y extraído su concentración es renovada restituida inmediatamente por las condiciones de contenido de materia orgánica ,pH óptimos, clase de textura y /o inducidos por prácticas de cultivo donde se incluye las enmiendas calcáreas.

Azabache (2003), quien indica que los iones Ca y Mg compiten con el K en su absorción por la planta, de tal manera que los suelos altos en estos cationes pueden requerir altos niveles de K para satisfacer la nutrición de los cultivos.

El abastecimiento de K en el suelo es limitado, aun los suelos que contienen arcillas ricas en este mineral no pueden suplirlo indefinidamente. Es un error creer que en suelos que por naturaleza son ricos en K, adicionar este elemento a los cultivos es innecesario. El potasio extraído por los cultivos debe de regresarse al suelo para no disminuir la {fertilidad del mismo; cuando él agricultor saca de la parcela o campo la cosecha, se está llevando consigo el K fuera del sistema agrícola tal como indica, (Gomero 1999)

Figura N° 19. Contenido de Potasio intercambiable a los 180 días de aplicación de dolomita



De acuerdo al análisis de varianza ANVA expresado en la tabla 23, al igual que en los otros casos se puede observar que en bloques estadísticamente no existen diferencias significativas ($p > 0,05$), da entender que la pendiente no tuvo influencia para potasio intercambiable en ningún bloque.

Así mismo, para tratamientos (dosis de cal dolomita) no se detectaron diferencias significativas, esto demuestra que las tres dosis consideradas de cal dolomita en estudio, no tuvieron influencia sobre el contenido de potasio intercambiable en el suelo. Corcondando con lo manifestado por azabache (2003), que indica la absorción de K puede ser reducida conforme se incrementan el Ca y Mg; e inversamente la absorción de Ca y Mg puede ser reducida conforme se incrementa la disponibilidad de K.

El coeficiente de variación fue de 28,28%, señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 23. Análisis de varianza para potasio intercambiable del suelo

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	0,07	2	0,03	4,22	0,1033	Ns
Dosis	0,03	2	0,01	1,59	0,3096	Ns
Error	0,03	4	0,01			
Total	0,13	8				

C.V.=28,28%

4.3.6 Capacidad de intercambio catiónico del suelo

La figura 20, nos permite comparar los valores obtenidos de CIC al inicio y al final del estudio. El promedio final de la CIC del suelo fue 9,86 meq /100gS aplicando 528kg/ha de cal dolomita que corresponden al T3. Estos resultados contrastan con los de Mite, Medina, y Espinosa (2009), quienes mencionan que conforme aumentan las dosis de cal también aumenta el pH lo que implica un incremento en los valores de CIC, SB y a la vez una disminución en los valores de acidez y aluminio intercambiable.

Según Ricce (2019), quien concluye que al adicionar la enmienda mejora la capacidad de intercambio catiónico debido a que se está adicionando fuentes de calcio y magnesio.

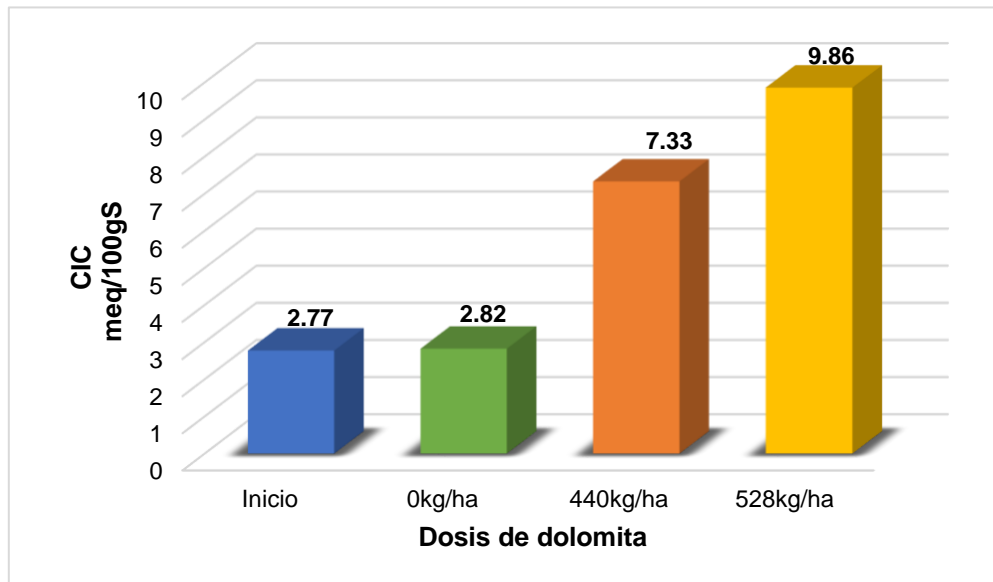
Campillo y Sadzawka, (2006), afirman que cuando disminuye la acidez se provoca aumento de la CIC; lo que le permite al suelo atraer mayor cantidad de cationes; y consecuentemente, asegurar el reservorio de nutrientes disponibles para las plantas

Muchos suelos tropicales corrientemente tienen valores de CIC menores de 4. En esos suelos el incremento de la CIC es un objetivo importante de manejo. Ello puede lograrse mediante dos procesos: Encalando suelos ácidos con sistemas de óxidos o de silicatos laminares con revestimiento de óxido, y aumentando el contenido de materia orgánica del suelo tal como indica (Sánchez, 1976).

Al respecto Tislade *et al.*, (1991), menciona que con las enmiendas calizas aplicadas sobre los cultivo, la capacidad de intercambio catiónico varía de horizonte en horizonte y en cada uno de ellos depende del contenido orgánico a la cantidad de materia orgánica, sin embargo un suelo con alta capacidad de intercambio catiónico retiene una gran cantidad de cationes en los sitios de intercambio (K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y otros).

En cambio la dosis 440kg/ha (T2) permitió mejorar el contenido de la Capacidad de Intercambio Catiónico en 7,33 meq/100gS, sin embargo aquel suelo donde no se agregó cal dolomita denominado testigo (T1) no mejoró el nivel inicial manteniéndose en la misma magnitud que el valor inicial con 2,82 meq/100gS

Figura N° 20. Contenido de la Capacidad de Intercambio Cationico a los 180 días de aplicación de dolomita



En la tabla 25, se muestra el análisis de varianza (ANVA) para la variable CIC del suelo, donde se puede apreciar que en bloques no existen diferencias significativas esto indica que la gradiente que se consideró como bloque no tuvo efecto directo en la CIC del suelo.

De la misma manera para tratamientos (dosis de cal dolomita) se obtuvo no significativo siendo que entre las tres dosis en estudio no se registraron diferencias estadísticas sobre el contenido de la CIC.

El coeficiente de variación fue de 28,28%, señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 24. Análisis de varianza para la capacidad intercambiable del suelo.

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	9,21	2	4,60	0,49	0,6434	Ns
Dosis	19,43	2	9,72	1,04	0,0034	**
Error	37,31	4	9,33			
Total	65,95	8				

C.V.= 26,92 %

Se detalla la prueba Duncan en la tabla 25, para las tres dosis de dolomita empleadas en la presente investigación, se observa que la dosis 528 kg/ha(T3) fue la que mejor ya que promovió el incremento de la CIC del suelo en 9,86 en cambio la dosis 440kg/planta (T2) fue de 7,33 meq/100gS y el T1 (testigo) mostro ser estadísticamente similares, es decir que aquellas plantas de café a las que no se aplicó ninguna dosis de cal dolomita comparados con el nivel de dosis más alto no mostraron diferencias significativas, con valores de 2,82 y 2,77 meq/100gS pH del suelo, respectivamente.

Tabla 25. Comparación de medias Duncan para la variable CIC del suelo

Dosis de dolomita	C.I.C. meq/100gS	Duncan (5%)
528 kg/ha	9,86	A
440 kg/ha	7,33	B
TESTIGO	2,82	B

4.3.7 Materia orgánica del suelo

El contenido de materia orgánica, al inicio del encalado fue 4,98%. Para todos los tratamientos. En la figura 21, se puede apreciar el efecto logrado por la aplicación de cal dolomita.

Durante el proceso del encalado el contenido de materia orgánica ascendió gradualmente a los 180 días de finalizar el proceso, los tratamientos T2 (440) y T3 (528 kg/ha) mostraron valores de 5,52 y 6,73 % respectivamente.

Pero aquel tratamiento testigo (t1) en el que no se agregó cal dolomita, mostro un aumento en cuanto a materia orgánica superando el valor inicial con 5,12%. Estos

resultados contrastan con los de Ruiz (2011), quien al aplicar enmiendas en su trabajo observo que la materia orgánica subió de bajo a alto.

Por otra parte, Thompson y Troeh (1994), indican que el encalado acelera la descomposición de la materia orgánica induciendo descenso en el suelo. Según Sadeghian (2016), menciona que el encalado incrementa la actividad microbiana de los microorganismos encargados de la mineralización de la materia orgánica del suelo.

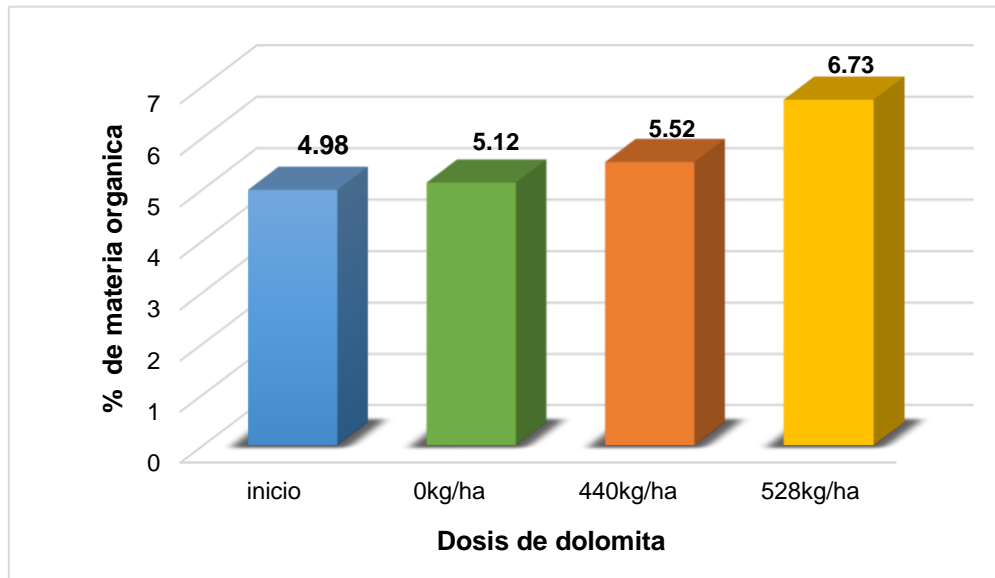
Al respecto Navarro et al. (2000), reporta que al incorporar enmiendas calcáreas a suelos ácidos, induce a cambios sobre el status de la materia orgánica. Los suelos con mejor disponibilidad de materia orgánica benefician el aumento de CIC, mejora la disponibilidad para el crecimiento microbiano, sirve como reservorio de nutrientes, disminuye la toxicidad del aluminio y estabiliza la estructura del suelo.

Infopos (1997), especifica que la cal quemada (CaO) presenta mayor poder de neutralización que la dolomita, con el mismo que se consigue pH más altos, donde se tendría mayor descomposición de los residuos de la planta y la degradación de la materia orgánica.

La materia orgánica del suelo contiene grupos carboxílicos y fenólicos activos que se disocian liberando iones H^+ a la solución suelo. El contenido de materia orgánica varia de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable (Espinoza, 2003).

Silva (2001), manifiesta que el encalado es la actividad mediante el cual se adiciona al suelo agregados de calcio o calcio y magnesio que son idóneos de reducir acidez cambiante e incrementar el pH. En general, la acidez en un suelo modifica directamente la actividad de muchos de los microorganismos en un suelo ácido, los que son encargados de transformar el material vegetal en materia orgánica.

Figura N° 21. Contenido de Materia orgánica a los 180 días de aplicación de dolomita



Seguidamente en la tabla 26, se observa el análisis de varianza (ANVA) para materia orgánica, donde nos muestra que estadísticamente no existen diferencias significativas entre bloques ($p > 0,05$); es decir que la pendiente no tuvo efecto en los resultados de la materia orgánica.

Asimismo para tratamientos (dosis de cal dolomita), lo cual da a entender que las diferentes dosis aplicadas de cal dolomita en estudio, no tuvieron un efecto significativo sobre el contenido de materia orgánica en el suelo.

El coeficiente de variación fue de 20,10%, señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 26. Análisis de varianza para la materia orgánica del suelo

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	15,88	2	7,94	6,10	0,0610	Ns
Dosis	5,77	2	2,89	2,22	0,0008	**
Error	5,21	4	1,30			
Total	26,86	8				

CV = 20,10%

En la tabla 27 y la figura 21, se detalla la prueba Duncan, para las tres dosis de cal dolomita utilizadas en la presente investigación. La dosis (528 kg/ha) de cal dolomita que corresponde al T3 con 6,73 % fue el que mejor promovió el incremento del contenido de materia orgánica en el suelo. Por otro lado, la dosis (440 kg/ha) T2 alcanzo niveles de materia orgánica de 5,52 %, estadísticamente son diferentes. En cambio, el testigo (T1) presento los valores más bajos con 5,12 %

Tabla 27. Comparación de medias Duncan para la variable materia orgánica del suelo

Dosis de dolomita	Materia Orgánica %	Duncan (5%)
528 Kg/ha	6,73	A
440Kg/ha	5,52	B
TESTIGO	5,12	B

4.3.8 Fosforo disponible

Inicialmente el suelo en estudio presentaba un valor de fosforo disponible igual a 21,80ppm; catalogado como alto (Chilon, 1997). La figura 22, presenta el efecto logrado durante el proceso del encalado después de los 180 días de estudio. Para el tratamiento 3 que corresponde a (520 kg/ha) de cal dolomita donde se agregó la mayor dosis de cal dolomita logo elevar el contenido de fosforo disponible con un valor final de 10,53 ppm seguidamente el T2 (440 kg/ha) registró un valor de 9,86 ppm.

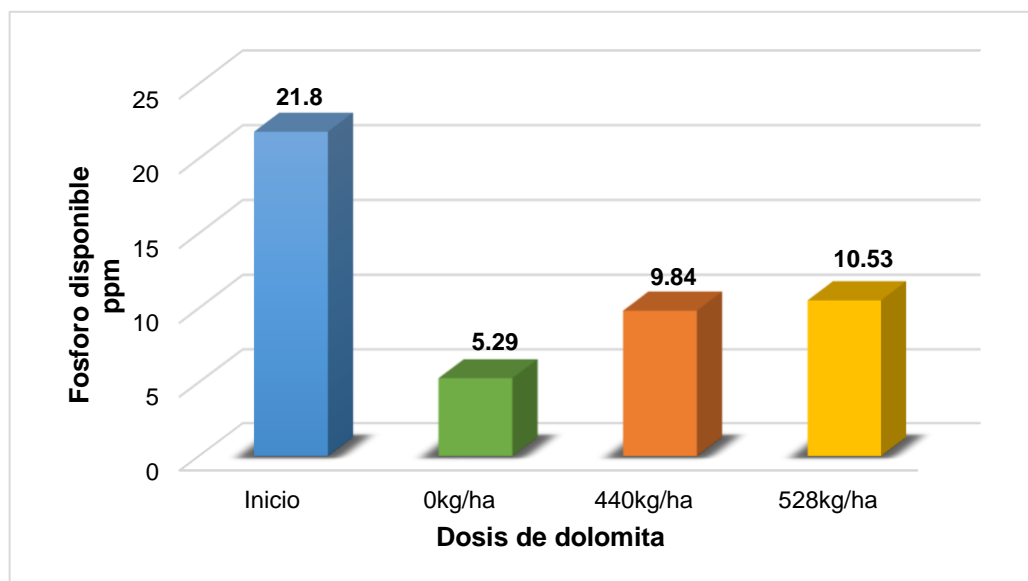
Así mismo el tratamiento sin influencia de cal dolomita T1 (testigo) ha permitido disminuir el contenido de fosforo disponible con un valor de 5,29 ppm, siendo bajo para el suelo. La Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (2001), menciona que en suelos ácidos la presencia de hierro y aluminio reaccionan con el fósforo y se precipita como fosfatos insolubles haciendo que el fósforo sea menos.

(Sánchez, 1976), indica que el encalado precipita el aluminio intercambiable y parte de los iones hidrox-aluminio como hidróxidos de aluminio, los cuales fijan considerablemente menos fósforo. El encalado de suelos ácidos con pH entre 5,5 y 6,0 disminuye la fijación de fósforo, pero no la elimina. El encalado no afecta la fijación por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, solo la de aluminio intercambiable.

Según Llactas (2016), la dolomita alta en magnesio es una alternativa eficaz para corregir suelos ácidos sobre todo para corregir la relación calcio - magnesio en algunos suelos, la dolomita neutraliza la toxicidad del aluminio soluble, desinfecta el suelo y lo nutre con calcio, magnesio y fósforo.

También (Cepeda, 1991). indica que la aplicación de un material encalante hace más disponible al fósforo, esto sucede principalmente, porque en los suelos ácidos el fósforo es fijado por el hierro y el aluminio soluble, ésta reduce la solubilidad de ambos ya que pueden precipitarse como hidróxidos de hierro $Fe(OH)_3$ y aluminio $Al(OH)_3$ lo que ocasiona que se incrementa la disponibilidad del fósforo para las plantas en el suelo en las formas asimilables que son el ortofosfato primario ($H_2PO_4^-$) y ortofosfato secundario.

Figura N° 22. Contenido de fósforo disponible a los 180 días de aplicación de dolomita



El Análisis de Varianza (ANVA) para la variable fósforo disponible del suelo luego del encalado presentó los siguientes resultados.

Tabla 28. Análisis de varianza para fósforo disponible del suelo

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	sig.
Bloque	1,13	2	0,57	37,11	0,0026	Ns
Dosis	5,75	2	2,87	2,62	0,0001	**
Error	0,06	4	0,02			
Total	6,94	8				

CV = 2,52%

De acuerdo con el ANVA detallado en la tabla 28, se observa que estadísticamente no existen diferencias significativas entre bloques ($p > 0,05$); lo cual indica que la pendiente no tuvo efecto directo en el contenido de fósforo disponible, esto indica que el diseño pierde precisión.

Sin embargo, para tratamientos si existen diferencias altamente significativas lo que quiere decir que las diferentes dosis de cal dolomita si causaron efecto significativo en la corrección del fósforo disponible del suelo.

Por tanto el tratamiento 3 conformado por (528 kg/ha) de cal dolomita fue el que más contribuyo en elevar el contenido de fósforo en el suelo lo cual obtuvo un valor de 10,53 ppm lo que determina que utilizando mayor cantidad de cal dolomita se conseguirán incrementos de fósforo en el suelo catalogado como alto. Por el contrario, el tratamiento 2(440kg/ha) logro disminuir en 9,84 ppm de fósforo disponible catalogado como bajo

Mientras que el testigo (sin cal dolomita) fue el que permitió disminuir el contenido de fósforo en 5,29 ppm, donde se puede afirmar que dosis crecientes de cal dolomita incrementan y regulan el contenido de fósforo.

El coeficiente de variación fue de 2,52% señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

La tabla 29 y figura 22, nos muestra la prueba Duncan, para las tres dosis de cal dolomita utilizadas en la presente investigación. Se observa que el tratamiento 3 conformado por

(528 kg/ha) cal dolomita determina que utilizando mayor cantidad de cal dolomita se conseguirá diferentes efectos en el contenido de fósforo disponible.

Por el contrario, el tratamiento 2(440kg/ha) logro incrementar en 9,84 ppm de fósforo disponible en el suelo. Mientras el testigo (sin cal dolomita) fue el que menos contribuyó en incrementar el contenido de fósforo con 5,29 ppm, siendo inferior al resto de los demás tratamientos

Tabla 29. Comparación de medias Duncan para fósforo disponible del suelo

Dosis de dolomita	Fósforo Disponible Ppm	Duncan (5%)
528 kg/ha	10,53	A
440Kg/ha	9,84	B
TESTIGO	5,29	B

4.4 Efecto del encalado en el cultivo de café

4.4.1 Altura de planta (m)

Las alturas alcanzadas a los 180 días por las plantas de café en los diferentes tratamientos se muestran en la figura 23, Las plantas sometidas a los tratamientos 2 y 3 de cal dolomita muestran valores de (1,26 y 1,39 cm) respectivamente mientras que, para el tratamiento 1 (testigo) donde no se agregó cal dolomita se obtuvieron alturas de 1,19 cm. Esto se atribuye a que la cal dolomita reacciona lentamente en el suelo, pero tiene un efecto más prolongado, al contrario de los fertilizantes que son más solubles y susceptibles de perderse por lixiviación (Zapata, 2004).

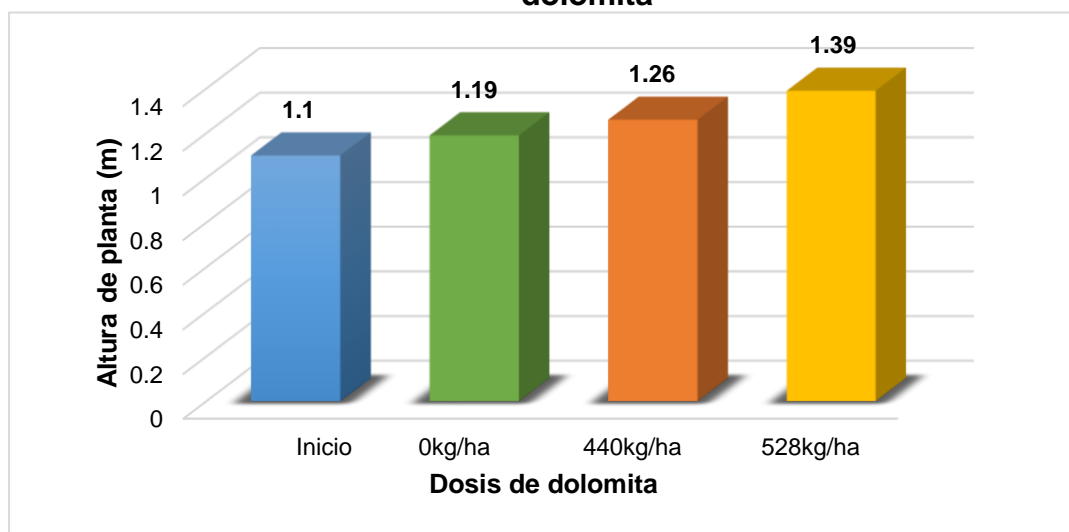
Por tanto, la altura de planta no muestra cambios rápidos por la aplicación de dosis crecientes de enmiendas calcáreas. A pesar de haber incrementado el pH, bases cambiables y reducidas la acidez cambiante dentro de los rangos óptimos, tal como menciona Castañeda (2000), afirma que el cultivo de café se desarrolla óptimamente a un pH de 4.5 a 5.5.

Coincidiendo también con lo referido por Sánchez (1976), El café, la piña y algunas especies de pasturas pocas veces responden a la cal, aun en suelos con alta saturación

de aluminio. El rendimiento del café sufre una disminución a partir de un 80% de saturación de aluminio, en Puerto Rico se obtienen altos rendimientos en café sin cal en suelos con pH de 3.8.

Según ensayos realizados por la Universidad Nacional del Centro del Perú se aplicó dosis de dolomita (0, 200, 400 y 600 kg/ha), donde se evaluó la altura de planta, diámetro de tallo. Los resultados indican que al aplicar las dosis de 200 Kg/ha de dolomita, las plantas presentan mayor diámetro de tallo y área foliar, ninguna dosis de dolomita mejoro la altura de plantas del café a los 9 meses de trasplante.

Figura N° 23. Valores de la altura de planta a los 180 días de la aplicación de dolomita



De acuerdo con los resultados del análisis de varianza ANVA (tabla 30), para la altura de planta se observa que no existe significancia para bloques ($p > 0,05$); lo que quiere decir que la pendiente no tuvo influencia en la altura de planta.

Por otra parte para tratamientos también no se presentan diferencias significativas pero si diferencias numéricas esto demuestra que ya sea que se aplique o no una dosis de cal dolomita, no provoca diferencia en la altura de planta debido al tiempo de monitoreo.

El coeficiente de variación fue de 8,17% señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 30. Análisis de varianza para altura de planta de café

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Bloque	0,05	2	0,03	2,32	0,2148	Ns
Dosis	0,07	2	0,03	2,99	0,1608	Ns
Error	0,04	4	0,01			
Total	0,16	8				

C.V. = 8,17 %

4.4.2 Diámetro de tallo (mm)

La figura 24, nos muestra los diámetros del tallo alcanzados. El T2 dio lugar a diámetro de tallo promedio 23,54 y T3 a 26,73 mm de diámetro de tallo. Los diámetros de tallo para los testigos donde no se agregó dolomita fue de 23,48 mm respectivamente.

Por tanto, se observan leves incrementos por ser una enmienda que reacciona lentamente en el suelo, la dolomita mantiene un efecto residual prolongado, al contrario de los fertilizantes que son más solubles y susceptibles de perderse por lixiviación (Zapata, 2004).

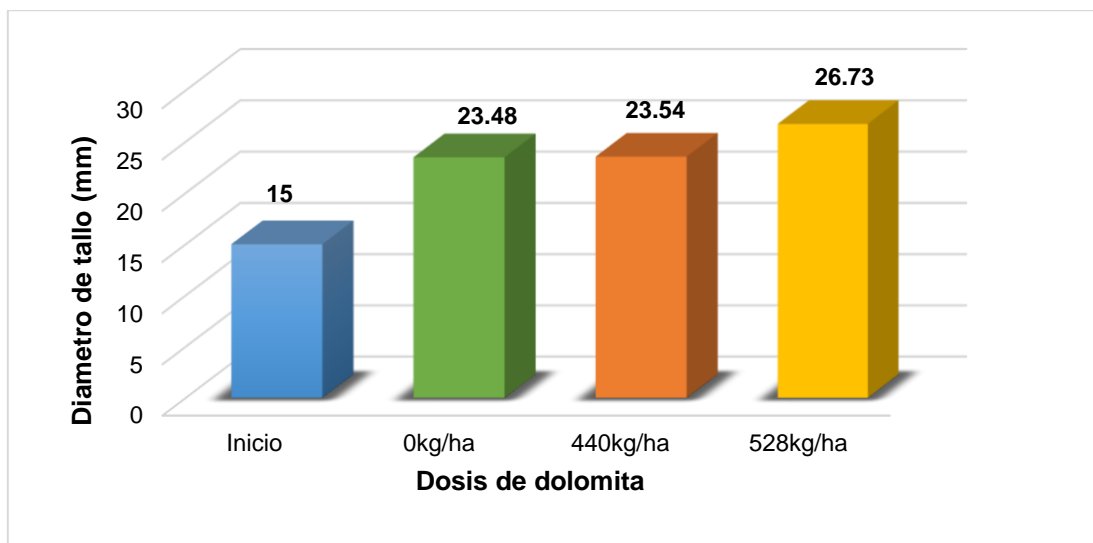
El diámetro de tallo no se ve favorecida por la aplicación de dosis crecientes de enmiendas calcáreas. A pesar de haber incrementado el pH, bases cambiables y reducidas la acidez cambiante dentro de los rangos óptimos, tal como menciona Castañeda (2000), afirma que el cultivo de café se desarrolla óptimamente a un pH de 4.5 a 5.5.

Coincidiendo también con lo referido por Sánchez (1976), El café, la piña y algunas especies de pasturas pocas veces responden a la cal, aun en suelos con alta saturación de aluminio. El rendimiento del café sufre una disminución a partir de un 80% de saturación de aluminio, en Puerto Rico se obtienen altos rendimientos en café sin cal en suelos con pH de 3.8.

Según ensayos realizados por la Universidad Nacional del Centro del Perú se aplicó dosis de dolomita (0, 200, 400 y 600 Kg/ha). Se evaluó la altura de planta, diámetro de tallo. Los resultados indican que al aplicar las dosis de 200 Kg/ha de dolomita, las plantas presentan mayor diámetro de tallo y área foliar, ninguna dosis de dolomita mejora y

altura de plantas del café a los 9 meses de trasplante.

Figura N° 24. Valores del diámetro de tallo a los 180 días de aplicación de dolomita



En base al diámetro de tallo del cultivo de café se procedió a realizar el ANVA, logrando los siguientes resultados. De acuerdo al ANVA se puede observar que no existe significancia para bloques ($p > 0,05$); quiere decir que el diámetro de tallo en ningún bloque actúa de manera diferente (tabla 31).

Para tratamientos (dosis de dolomita) de igual manera no presentan diferencias significativas después de la aplicación de dosis crecientes de dolomita esto debido al tiempo de monitoreo.

El coeficiente de variación fue de 7,85% señalando que el ensayo se condujo dentro de los parámetros estadísticos de aceptación.

Tabla 31. Análisis de varianza de diámetro de tallo para la planta de café

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Bloque	27,97	2	13,98	3,76	0,1205	Ns
Dosis	20,79	2	10,39	2,79	0,1740	Ns
Error	14,88	4	3,72			
Total	63,63	8				

C.V. = 7,85 %

5. CONCLUSIONES

Una vez realizada las evaluaciones de campo y los resultados obtenidos de la presente investigación. Evaluación del efecto de la dolomita sobre las propiedades químicas del suelo del cultivo de café (*Coffea arabica*) se llega a las siguientes conclusiones:

- Luego de los seis meses de evaluación el pH se incrementó significativamente de 4,75 a 6,24 lo que quiere decir que paso de un nivel fuertemente acido a moderadamente, aplicando (528kg/ha) T3 de cal dolomita.
- Al aplicar (528kg/ha y 440kg/ha) de cal dolomita que corresponden al T3 y T2, se logró mejorar la disponibilidad de calcio intercambiable del suelo de 0,85 a 4,3 meq/100gS. de igual manera para el contenido de magnesio intercambiable en forma creciente de 1,97 a 4,63 meq/100 g S.
- Así mismo los contenidos de CIC, materia orgánica Fosforo disponible si presentaron respuestas favorables con la aplicación de dosis crecientes de la enmienda. Sin embargo, no sucedió lo mismo para potasio intercambiable.
- Con respecto al comportamiento agronómico del cultivo de café no se obtuvo estadísticamente diferencias significativas para la altura de planta, diámetro de tallo debido al escaso tiempo de monitoreo.
- La aplicación de cal dolomita permitió reducir la acidez del suelo de 1,41 a 0,49 meq/100gS y el porcentaje de saturación de acidez de 35,74 a 3,45 %, cuando se aplican (528kg/ha) T3.
- A pesar de haber una mejoría en la acidez de los suelos, en el pH y en el porcentaje de saturación de acidez, los tratamientos con cal dolomita no presentaron un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas de café hasta el momento.
- Por lo tanto el trabajo de investigación concluye que el T3 (528kg/ha) dolomita considerado el mejor tratamiento tuvo un mayor efecto en algunas propiedades químicas del suelo, logrando de esta manera neutralizar la acidez intercambiable del suelo.

6. RECOMENDACIONES

- Ampliar el tiempo de evaluación del efecto de la dolomita sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Promover en las instituciones públicas y privadas que tienen que ver con la producción de alimentos, la importancia de contar con el análisis completo y especialmente del pH, Al^{3+} intercambiable y CIC del suelo, antes de disponer el uso del suelo para actividades agroproductivas en la región yungueña y amazónica del norte del departamento de La Paz.
- Realizar estudios económicos de la aplicación de las enmiendas calcáreas en plantaciones de café en producción
- Los usuarios del recurso suelo con fines de producción de alimentos deben solicitar a los comercializadores de productos calcáreos la ficha técnica donde se describa el PRNT, aspecto que facilitará el cálculo de la dosis de la cal a ser aplicada.
- Establecer parcelas de ensayo en suelos degradados por la acidez, en las tres zonas agroecológicas del municipio de Caranavi, bajo un enfoque de cultivo asociado entre forestales, frutales y cultivos anuales aplicando la dosis determinada por el método de Van Raij, Cochrane y otros.

7. BIBLIOGRAFÍA

ABREU JR., C. H., MURAOKA, T., & LAVORANTE, A. F. (2003). Relações entre acidez e propriedades químicas de solos Brasileiros. *Scientia Agricola*, 60(2), 337-343. Retrieved from

AGROBANCO. (2012). Asistencia Técnica Dirigida en: Toma de muestras y recomendaciones de fertilización en cultivos Tropicales. (en línea). Consultado el 18 de Julio de 2020. Disponible en: <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/039-a-tropicales.pdf>

ALALUNA, E. (2000). *Evaluación del efecto de fertilización, aplicación de estiércol y absorción de elementos en el rendimiento de la secuencia papa-kiwicha, evaluado mediante la técnica del elemento faltante* (Tesis de grado no publicado) Universidad Nacional Agraria La Molina.

ALÉGRE, C. (1959). Climats et caféiers d' Arabie. *Agronomía Tropical* 14: 23-58.

ALVARADO, A. (2004). *La saturación de la acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (Tectona Grandis L.F.) en suelos Ácidos de Costa Rica.* (Tesis de grado). Facultad de Agronomía, Costa Rica.

ANACAFE. (2016). Especies y variedades del café. (en línea). Consultado el 13 de abril del 2016. Disponible en: <https://www.anacafe.org>.

ARCILA, J.; FARFAN, V.; MORENO, A.; SALAZAR G., Y HINCAPIE, G. CENICAFÉ, (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. *Fitotecnia, Practicas de cultivo, Manejo de cafetales.* Chinchiná – Colombia. 309 p.

ARANDA, (2010). Mejores prácticas para la producción de café en el estado de Oaxaca con enfoque a mitigación del cambio climático. *Guía de buenas prácticas para café sustentable, México.* 115 p.

ARCILA, J. (2007). Crecimiento y Desarrollo de La Planta de Café. Colombia. Chinchiná.

- ARIAS, N. (2004).** Caracterización de la fertilidad de los suelos de la Zona Central palmera de Colombia. Palma. pp.135-147.
- ARVILDO, J. (2009).** Efecto de las enmiendas orgánicas en las propiedades físicas químicas de un suelo degradado San Jorge, Tingo María.
- ATLAS BOLIVIA CIMA. (2010).** Consultado el 3 de abril del 2016. Disponible en: www.atlas.bolivia.bo.
- AYRE, J. (2016).** Producción de café con responsabilidad ambiental. Programa Regional Centro - UOT Selva central. Lima, Perú: DESCO - Programa selva central.
- AZABACHE, A. (2003).** Fertilidad de suelos para una agricultura sostenible. Huancayo, Perú.
- BARRIENTOS, R. (2011).** Manual para las escuelas de campo. La Paz, Bolivia. 131pp.
- BATISTA, M., MOSCHETA, I., BONATO, C., BATISTA, M., GARCIA DE ALMEIDA, O., & INOUE, T. (2012).** Aluminum in corn plants: Influence on growth and morpho-anatomy of root and leaf. Revista Brasileira de Ciência do Solo.
- BAZÁN, R., ROMERO, C., VALENCIA, M., NAZARIO, J., GARCÍA, S. (2000).** Guía de Prácticas de Edafología. Departamento de Suelos. Universidad Nacional Agraria La Malina. 49 p.
- BERNAL, A.; HERNÁNDEZ, A.; MESA, M.; RODRÍGUEZ, O.; GONZÁLEZ, P Y REYES, R. (2015).** Características de los suelos y sus factores limitantes de la región Murgas, provincial de La Habana. Cultivos Tropicales. pp.30-40.
- BERNIER V, R Y ALFARO V, M. (2006).** Acidez de los suelos y efectos del encalado. (en línea). Consultado el 22 de septiembre del 2020. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR33824.pdf>.
- BORNEMISZA, E. (1988).** Oligoelementos en la nutrición del cafeto. Curso Regional Sobre Nutrición Mineral del Café. IICAPROMECAFE. San José, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.google.com.pe>

- BOHN, H. (2002).** Química de suelo. Grupo Noriega. México.pp.80.
- CARVAJAL, J. F. (1984).** Cafeto - Cultivo y Fertilización. Instituto Internacional de la Potasa. Berna, Suiza.
- CASTAÑEDA, E., (2000).** El ABC del café: cultivando calidad. Lima, Perú.pp. 68.
- CAMPILLO, R. Y SADZAWKA. A. (1999).** La acidificación de los suelos, origen y mecanismos involucrados Centro regional de investigación INIA la platina.
- CAMPILLO, R., & SADZAWKA, R. (2006).** Acidificación de los suelos, origen y mecanismos involucrados.pp. 44-60
- 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.pp.246-257.
- CENICAFE. (2007).** Manejo de los cafetales para estabilizar la producción en las fincas cafetaleras. Revista Científica. (en línea). Consultado el 3 de septiembre Abril de 2007.Disponible en: <http://cenicafe.org.co>
- CEPEDA, J. (1991).** Química de suelos,Segunda edición, EdicionesTrillas. México.p 50-51.
- CICAFE (CENTRO EN INVESTIGACIONES EN CAFÉ). 2011.** Guía técnica para el cultivo de café. Instituto del café de Costa Rica.Primer Edición. Heredia - Costa Rica.p 72.
- CIPCA; (CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y PROMOCIÓN DEL CAMPESINO). 2006.** La producción de café en Bolivia. Revista informativa CIPCA. (en línea).Consultado el 30 de septiembre del 2016. Disponible en: <http://cipca.org.bo>.
- CÓLEMAN N. T, Y THOMAS, G.W. (1967).** La química básica del suelo acido. Revista agronómica. Recuperado de (<http://soil.scijournals.org/cgi/content/full/71/3/1038> No 12:1-41.

- COTLER, H., A. PRIEGO, C. RODRÍGUEZ Y C. ENRIQUEZ. (2004).** Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta ecológica* 71: 79-92.
- CORPOICA, M. V. (2005).** Efectos de la aplicación de cal dolomítica y yeso agrícola en cafetales (*Coffea arabica*) afectados con mal de viñas en Guatemala. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*. Costa Rica.
- CUBA, N. (2006).** Manual para el cultivo del café en Yungas. Universidad Católica Boliviana "San Pablo". La Paz, Bolivia.
- CRISTANCHO, J., HANAS, M., SYED, R., & RASI, M. (2010).** Variations in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) progeny response to high aluminum concentrations in solution culture. *Plant Biology*.
- DONAHUE, R L., MILLER, R y SHICKLUNA, J. (1982).** Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Ediciones. Prentice/Hall. Intemat. Colombia. 624 p.
- DONOSO, C. (1992).** *Ecología forestal*. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
- DUICELA, G. (2011).** Manejo sostenible de fincas cafetaleras: Buenas prácticas en la producción de café arábico y gestión de la calidad en las organizaciones de productores. Porto Viejo, Ecuador, Imprenta CGRAF, Manta. COFENAC (Consejo Cafetalero Nacional). 309 p.
- CHAPMAN, H. (1966).** Diagnostic criteria for plants and soil. University of California Division of Agricultural Sciences. Riverside, California.
- CHAVEZ, M.A. (1993).** Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo. San José, Costa Rica.

- CHILÓN, E. (1997).** Manual de Edafología, practica de campo y laboratorio. Universidad Mayor de San Andrés La Paz, Bolivia.
- ELOY, M Y ALFREDO. (s.f).** Manejo de la acidez y encalado del suelo <https://agro.ucr.ac.cr/cabalceta/af0208/Encalado2.pdf> Facultad de Ciencias Agroalimentarias UCR.
- ENCINA, A. (2016).** Efectos nocivos del aluminio en el suelo. Recuperado de <http://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/abc-rural/efectos-nocivos-delaluminio-en-el-suelo---prof-dr-arnulfo-encina-rojas--1509421.html>
- ESPINOSA, J., Y MOLINA, E. (1999).** Acidez y encalado de los suelos. Quito, Ecuador
- ESPINOSA, J. (2003).** Encalados de suelos tropicales. En: manejo integral de la fertilidad del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencias del suelo. Bogotá
- ESPINOSA, J. (2010).** Fundamentos de Química de suelos. Documento de Clase. UTE, Santo Domingo de los Tsáchilas. p. 29.
- FAGERIA, N., & BALIGAR, V. (2008).** Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. In D. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (pp. 345-399). London
- FAO. (2015).** Portal de Suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacionde-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- FASSBENDER, H. (1987).** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica: IICA.
- FECAFEB (2016).** Café en Bolivia Boletín Informativo (en Línea): Disponible en: <http://www.fecafeb.bo.or>.

- FEIXA, X. (2001).** Poliaminas y tolerancia al aluminio en variedades tolerantes y sensibles de (*Zea mays*.) (Tesis de grado). Universidad de Barcelona-Facultad de Ciencias, España.
- FIGUEROA, R. (1996).** La caficultura en el Perú. Recuperado de www.lilcr.com.
- GIL, F. (1995).** Elementos de fisiología vegetal. Relaciones hídricas. Nutrición mineral. Transporte. Metabolismo. Madrid, Barcelona. 1147 p.
- GOMERO, O. (1999).** Manejo ecológico de suelos; conceptos, experiencias y técnica. Lima, Perú.
- GUHARAY, F; MONTERREY, J; MONTERROSO, D; STAVER, C. (2000).** Manejo integrado de plagas en el cultivo del café. Manual técnico N° 44. Managua, NI. 272 p
- HENIN, S. Y GRASS, R. (1972).** El perfil cultural. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 35 - 40.p
- HOLDRIDGE, L. (1982).** Ecología de zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA
- IICA (INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA). 1995.** Caracterización de la caficultura Hondureña: Síntesis. Tegucigalpa, HN. 43 p.
- INFOAGRO. (2019).** El Cultivo Del Café. 4a Parte. Recuperado de (<https://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/cafe4.htm>).
- INFOFOS. (1997).** Manual internacional de fertilidad de suelos Quito
- INATEC (Instituto Nacional Tecnológico). (2016).** Manual de protagonista vivero y semilleros. Recuperado de [https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spzatt/Manual de Vivero y semillero.pdf](https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spzatt/Manual%20de%20Vivero%20y%20semillero.pdf)

INE (Instituto Nacional de Estadística). (2012). Producción de café en Bolivia.

IÑIGUEZ, M. (2001). Manejo y Conservación de Suelos y Aguas. Loja, Ecuador.

IHCAFE, (INSTITUTO HONDUREÑO DEL CAFÉ). 2001. Manual de caficultura. 203 p.

JACKSON, A. (1967). *Physiological effects of soil acidity in soil acidity end agronomy*, Pearson F. Adams, Eds). Madison Amer. 43-124pp. Recuperado de (<http://www.publish.csiro.au/paper/SR9950425.htm> journal of soil research. Australian

JARAMILLO, D. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

KAMPATH, E.J. (1984). Soil acidity and liming. Papers commemorating a Century of Soil Science. Soil Science Society of North Carolina, Raleigh, North carolina, USA.

LEDENT, J. (2002). Manual. Déficit hídrico y crecimiento de las plantas: Respuestas al déficit hídrico. Comportamiento morfo fisiológico. Modelado del crecimiento de las plantas. Centro Internacional de la Papa. 79 p.

LIAO, H., WAN, H., SHA', J., WANG, X., YAN, X., & KOCHIAN, L. (2006). *Phosphorus and Aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of speci\$c organic acids from di'ereent regions of the intact root system. Plant Physiology*, 141, 674-684.

LIZARRO, W. (1997). Evaluación Agronómica de Producción de Café Orgánico y Convencional a Nivel Productor en los Yungas de La Paz, (Tesis de grado) Universidad Mayor de San Andrés – Facultad de Agronomía. Bolivia.

- LIZARRO, W. Y RODAS, R. (2010).** Poda de agobio y soca en la producción del cafeto
120 p.
- LLACTAS, F. (2016).** Influencia de la dosis de aplicación de dolomita en la concentración de cadmio en el cultivo de café en parcelas de la COOPAIN.
- MALAVOLTA, E. (1992).** Reacción del suelo y el café. Memorias del seminario "Fertilización y Nutrición del Café". ANACAFE-INPOFOS. Guatemala.
- MAMANI, A. (2003).** Caracterización Del Cultivo Del Café. Bolivia,
- MANAGEMENT (2014).** Aluminio en el suelo: *Evitando su toxicidad*. Recuperado de <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/aluminum-in-soil>
- MAYHUA Y COL (2008).** Instalación y conservación de pastos cultivados en altura. Incagro. Proyecto: "Identificación de alpacas de alto valor genético con mejora del medio ambiente y fortalecimiento de capacidades". Huancavelica – Perú.
- MARQUEZ ROMERO, F. R. (2015).** Sustentabilidad de la caficultura orgánica en la Convención Cusco. Tesis de posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, (En línea). Consultado el 11 de Julio del 2020
Disponible en:
http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1771/E20_M376_T%20BAN%20UNALM.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras),2021.** Programa Nacional de Café. (En línea). Consultado el 2 de julio del 2021.Disponible en:
<https://www.ruralytierras.gob.bo/index.php?in=8162>
- MIRANDA, R., Y CABALLERO, A. R. (2015).** Métodos y Análisis del Suelo.

MITE, F., MEDINA, L., & ESPINOSA, J. (2009). Efecto de la corrección del pH en el rendimiento de piña en suelos volcánicos. *Informaciones Agronómicas*, 1-5.

MOLINA, E. Y MELÉNDEZ, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Mimeo.

MONROIG, M. (2000). Descripción de variedades de *Coffea arabica* más cultivadas en Puerto Rico Recuperado de <http://descripcion.de.variedades.de.coffea.arabica.mas.cultivadas.en.puerto.rico>.

MONROIG, M. (2015). Manual para la propagación del cafeto en Puerto Rico. Recuperado de <https://academic.uprm.edu/monroig>.

MOLINA, E., Y ROJAS, A. (2005). Efecto del encalado en el cultivo de naranja valencia en la zona norte de Costa Rica. Recuperado de: MAG, (<http://www.mag.go.cr/revagr>)

MOYA, C. Y ZANTUA, M.I. (1991). Caracterización de la Fertilidad de Suelos de la región Cafetalera de Santa Bárbara, Honduras. XIV Simposio de Caficultura Latino Americana, Mesa de Trabajo:Suelos, Fisiología y Beneficiado. PROMECAFE.Panamá.

NARVÁEZ. (2010). Facultad de Ciencias Básicas. Docente Ocasional. Universidad de la Amazonía. Email: hematita@latinmail.com.

NAVARRO, G. (2003). Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda Edición. España. 486 p

- OCHOA, R. (2009).** Diseños Experimentales. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- OIRSA. (2000).** Manual técnico Buenas Prácticas de Cultivo en café orgánico para productores. Altertec.
- OLDEMAN, L. R., AND G. W. J. VAN LYNDEN, (1998):** *Revisiting the Glasod Methodology. Methods for 43 Assessment of Soil Degradation*, R. Lal, W.H. Blum, C. Valentine, and B.A. Stewart, Eds., CRC 44 Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 423–440
- ORSAG, V. (2010).** El recurso suelo principios para su manejo y conservación. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- ORTEGA, B. R. (1999).** Muestreo de suelos para recomendación de fertilizantes. En curso para Operadores del programa Recuperación de Suelos Degradados INIA-SAG Chillan.
- ORTIZ, A.E. (2008).** Evaluación del efecto de la cal dolomita sobre algunas características químicas en un suelo ácido y la absorción de nutrientes en el cultivo de piña (*Ananas comosus*) (L) merr. Híbrido md-2 en Finca Ganadera la Flor s.a. en río cuarto, Grecia. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de agronomía. Costa Rica..
- ORTEGA, J. (2014).** Manejo de la acidez y encalamiento de los suelos. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/132690849.pdf>
- OSORNO, H (2012).** La Acidez Del Suelo. Recuperado de https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/6194/pg_067-080_nacc2.pdf?sequence=1.

- PADILLA, W. (2007).** Manejo de la química y fertilidad de los suelos (4.^aed). Clínica Agrícola .
- PALMA, M.R. (1999).** Estimación de los requerimientos de fertilización del café (*Coffea arabica* L.) a partir del diagnóstico químico del suelo. XIV Simposio de Caficultura Latino Americana, Mesa de Trabajo: Suelos, Fisiología y Beneficiado. PROMECAFE. Panamá.
- PDA, (2007).** Taipiplaya Informes Anuales. La Paz, Bolivia.
- PEARSON, R. (1995).** Soil Acidity and Liming in the Humid Tropics. - Cornell International Agriculture 30: 66 p,
- QUIROGA, M.J. (2014).** *Efecto de la aplicación de materiales encalantes en el cultivo de la vid cv. Mencía en la D.O. Bierzo, incidencia sobre la composición fenólica y evolución en la crianza del vino.* Tesis Doctoral. Universidad de León. León, ES. (En línea). Disponible en [file:///C:/Users/Admin/Downloads/tesis_c2d153%20\(1\).](file:///C:/Users/Admin/Downloads/tesis_c2d153%20(1).)
- QUISBERT, M. (2018).** Evaluación del efecto de las enzimas fitasa y xilanas en la producción de pollos parrilleros de la línea cobb 500, en la colonia San Isidro, provincia Caranavi. (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés – Facultad de Agronomía. Bolivia.
- RICSE GALA, E. R. (2018).** Efecto de enmiendas en un suelo ácido con cultivo de *Phaseolus vulgaris* L., variedad norteño-Satipo. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4880>.
- RODRIGUEZ, S. F. (1982).** Fertilizantes – Nutrición Vegetal. A.G.T. Editor, S.A. México. p. 33 - 53.
- RODRIGUEZ, M. (2015).** Enfermedades más comunes del cafeto en Puerto Rico. Recuperado de <http://academic.uprm.edu> >mmonroig

- ROJAS, N. (2016).** *Caracterización física y química de los suelos productivos de tres comunidades del municipio de Ancoraimos segunda sección de la provincia Omasuyos*, (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés- Facultad de Agronomía. Bolivia.
- RUIZ, P. V. (2011).** *Efecto de la dolomita en las propiedades físicas y químicas del suelo, en el cultivo de cacao (Theobroma Cacao L.) bajo condiciones de acidez, en Ridardo Palma-Naranjillo.* Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/430>.
- SADEGHIAN K., S. (2008).** Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Boletín Técnico No. 32. Chinchiná: CENICAFÉ, 43 p.
- SADEGHIAN, S. (2016).** La acidez del suelo una limitante común para la producción de café. Recuperado de <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/704>
- SÁNCHEZ, P.A. (1976).** Properties and management of soils in the tropics. Wiley, New York. 618 p
- SANCHEZ. P. (1981).** Suelos del Trópico Características y Manejo. Estados Unidos de América
- SANCHEZ, E. (2001).** Manual de manejo y fertilización de suelos cafetaleros en Satipo, Perú
- SANCHEZ P. Y SALINAS J. (2008).** Suelos ácidos. Estrategias para su manejo con bajos insumos en América tropical. Sociedad Colombiana de las Ciencias del suelo. pp. 41-45.
- SALAMANCA, R. (1984).** Suelos y fertilizantes. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- SENAMHI** (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Bolivia). En línea. Consultado el 6 de enero de 2022 Disponible en: www.servicio.nacional.de.metereologia_hidrologia.bo.es

- SELENI, V. (2021).** Relación de las propiedades edáficas y la distribución radicular en la producción del cultivo de café (coffea arabica l.) Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo Maria, Peru.
- SILVA, M. F. (2001).** Fertilidad de suelos-diagnóstico y control. Colombia.
- SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. (2001).** Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control. Bogotá
- SOLÓRZANO, R. (2005).** Condiciones Edafo-Climáticas, Morfología y Propagación de Las Plantas. Módulo de Aprendizaje.
- TAXA, L. J. (2015).** Sistema tradicional de clasificación de tierras utilizado por la comunidad campesina de Laraos-Yauyos”. Universidad Nacional del Centro del Perú, Junín, Huancayo. (En línea). Consultado el 3 de septiembre de 2019. Disponible en:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3512/Taxa%20Villegas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- TISDALE, S. L. Y W.L. N. (1991).** Fertilidad de los suelos y fertilizantes. 2a edition, Traduction al espanol de J. Balasch y C. Pina. UTEHA. México.
- THOMPSON Y TROEH. (1994).** Los suelos y su fertilidad. Barcelona
- TOLEDO M. (2016).** Manejo de Suelos Ácidos de las zonas altas de Honduras. Tegucigalpa, Honduras. IICA. 45 p.
- USDA-NCRS. (2021).** Plants Database.(En línea).Consultado el 26 de abril del 2021. Disponible en <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=COAR2>
- VÁZQUEZ, M; TERMINIELLO, A; CASCIANI, A; MILLÁN, G; CÁNOVA, D; GELATTI, P; GUILINO, F; DORRONZORO, A; NICORA, Z; LAMARCHE, L; GARCÍA; M. (2012).** Respuesta de la soja (Glicine max l. merr) a enmiendas básicas en suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. (En línea). Disponible en <http://www.scielo.org.ar/scielo.pdf>

VEGA, M. (2014). Efecto de la materia orgánica y encalado del suelo en cebada (*Hordeum vulgare* L.) variedad una 96 cultivado en invernadero. Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

ZAVALETA, A. (1992). Edafología: El suelo en relación con la Producción. Lima

ZAPATA, R. (2004). La química de la acidez del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis de suelos luego de la aplicación de dolomita a los seis meses

	Ph	AL	Ca	Mg	k	CIC	MO %	P ppm
	Meq/100gS							
T0B1	4.73	1.30	0.58	0,15	0.10	2.13	4,97	2.33
T0B2	4,45	1.35	1.10	0.30	0.22	2.97	4,73	9.27
T0B3	4.10	1.46	0.96	0.55	0.40	3.37	5.67	4,27
T1B1	5.17	0.85	3.50	2.10	0.27	6.72	4.85	12.07
T1B2	5.00	0.50	3.98	2.55	0.38	7.41	5.30	6.67
T1B3	4.55	0.24	4.00	3.20	0.42	7.86	6.40	10.80
T2B1	6.08	0.58	4.20	3.10	0.37	8.25	5.11	2.45
T2B2	6.20	0.49	3.00	4.60	0.44	8.53	5,17	24.00
T2B3	6.45	0.39	5.70	6.20	0.52	12.81	9.92	5.13

Anexo 2. Datos obtenidos del cultivo de café luego de la aplicación de dolomita a los seis meses

	Altura de planta (m)	Diámetro de tallo (mm)
T1B1	1,16	21,9
T1B2	1,29	21,46
T1B3	1,08	23,69
T2B1	1,27	25,67
T2B2	1,5	27,07
T2B3	1,28	27,24
T3B1	1,13	23,04
T3B2	1,39	21,9
T3B3	1,43	29,26

Anexo 3. Muestreo del suelo



Se recolecto las submuestras a 30 cm de profundidad con una pala recta, posteriormente se hizo el cuarteo.

Anexo 4. Identificación y obtención de la muestra de suelo



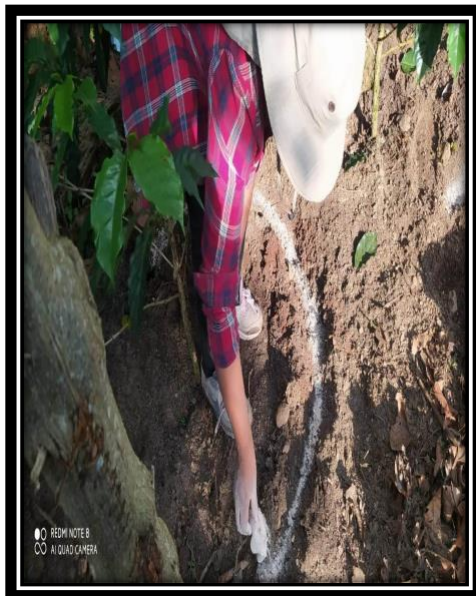
Se recolecto una muestra compuesta de 1kg y se registró los datos en la etiqueta para el análisis de suelo

Anexo 5. Limpieza del área experimental



Se realizó el plateado para la Incorporación de cal dolomita

Anexo 6. Incorporación de dolomita



Aplicando las dosis de dolomita según el diseño experimental en forma circular y media luna

Anexo 7. Evaluación de las variables agronómicas de café



Midiendo el diámetro basal del tallo, con el vernier (mm)



Midiendo la altura de planta con la cinta métrica (m)

Anexo 8. Recolección de muestras de suelo luego de los seis meses de aplicación



Muestras de suelo según dosis de dolomita luego de los seis meses para la evaluación de las características químicas físicas